



ICES  
VIŠJA STROKOVNA ŠOLA

Diplomsko delo višješolskega strokovnega študija  
Program: Elektroenergetika

## **ZAŠČITA VELIKIH ENERGETSKIH TRANSFORMATORJEV**

Mentorji: mag. Jože Kragelj, univ. dipl. inž. el.

Kandidat: Peter Ogrinc

Somentorji: Anton Majcen, univ. dipl. inž. el.

Franc Prepeluh, univ. dipl. inž. el.

dr. Peter Kosmatin, univ. dipl. inž. el.

Lektorica: Mateja Lašič, prof. slov. in nem.

Ljubljana, november 2017

## **ZAHVALA**

Zahvaljujem se mentorjem Jožetu Kraglju, Antonu Majcnu in Francu Prepeluhu za ponujeno/nudeno strokovno pomoč.

Hvala g. Petru Kosmatinu iz podjetja Kolektor Etra za pomoč in nasvete pri izdelavi diplomskega dela.

Zahvaljujem se tudi lektorici Mateji Lašič, ki je mojo diplomsko nalogo jezikovno in slovnično pregledala.

Zahvaljujem se svoji družini, ki mi je v času študija ves čas stala ob strani.

Zahvaljujem se prijateljema Alešu Koštomaju in Andreju Učakarju za pomoč in podporo v času študija.

## IZJAVA

»Študent Peter Ogrinc izjavljam, da sem avtor tega diplomskega dela, ki sem ga napisal pod mentorstvom mag. Jožeta Kraglja, univ. dipl. inž. el., Antona Majcna, univ. dipl. inž. el., Franca Prepeluha, univ. dipl. inž. el. in somentorja dr. Petra Kosmatina, univ. dipl. inž. el..«

»Skladno s 1. odstavkom 21. člena Zakona o avtorski in sorodnih pravicah dovoljujem objavo tega diplomskega dela na spletni strani šole.«

Dne \_\_\_\_\_

Podpis: \_\_\_\_\_

## **POVZETEK**

V nalogi so opisani zaščitni sistemi velikih transformatorjev, ki povezujejo 400, 220 in 110 kV napetostne nivoje v prenosnem sistemu. Nastavitev tako osnovne kot rezervne zaščite mora zadostiti zahtevam po selektivnosti, hitrosti in zanesljivosti. Za optimalno nastavitev zaščite so potrebni parametri impedanc transformatorjev, ki pa morajo biti izmerjeni.

Naloga obravnava dve metodi merjenja ničnih impedanc transformatorja. Prva metoda merjenja je možna samo pri proizvajalcu, druga pa omogoča uporabo sodobne tehnološke opreme in tudi meritve na terenu. Meritve ničnih impedanc po obeh metodah so izvedene na transformatorju s prestavnim razmerjem 400/115 kV, nazivne moči 300 MVA. Podana sta primerjava rezultatov in izračun nastavitve funkcije distančne zaščite za merjeni transformator.

## **ABSTRACT**

The graduation thesis describes protection systems of large power transformers that connect 400, 220 and 110 kV voltage levels in the transmission system. The setting of both, basic and backup protection must meet the requirements on selectivity, speed and reliability. Optimal protection settings depend on accuracy of the transformer impedance parameters that are measured.

The task deals with two methods of measuring zero sequence impedance of a transformer. The first method measurements are only possible at the site of manufacturer, while the other enables the use of modern technological equipment and measuring of the impedances on the ground. The measurements of the zero sequences impedances by both methods are carried out on a transformer with a transmission ratio of 400/115 kV and nominal power of 300 MVA. A comparison of results is given. Calculation of the distance protection function settings for the measured transformer is also given.

## KAZALO

1. UVOD .....	1
2. IZVEDBE VELIKIH TRANSFORMATORJEV .....	1
2.1 DELITEV IN VLOGA TRANSFORMATORJA V EES-u .....	2
2.2 GLAVNI DELI TRANSFORMATORJA .....	3
2.3 VEZAVE NAVITIJ TRIFAZNIH TRANSFORMATORJEV .....	5
2.4 OZEMLJITVE ZVEZDIŠČ TRANSFORMATORJEV .....	5
2.5 NIČNE IMPEDANCE TRANSFORMATORJEV .....	7
2.5.1 NIČNE IMPEDANCE TRANSFORMATORJEV .....	9
3. ZAŠČITNI SISTEM INTERKONEKCIJSKEGA TRANSFORMATORJA .....	10
3.1 DIFERENČNA ZAŠČITA .....	11
3.2 DISTANČNA ZAŠČITA .....	12
3.3 NADTOKOVNA ZAŠČITA .....	13
3.4 ZEMELJSKOSTIČNA DIFERENČNA ZAŠČITA .....	14
3.5 ZAŠČITA PRI PREVISOKEM FLUKSU V/Hz .....	14
3.6 AVTONOMNE ZAŠČITE .....	14
3.6.1 PLINSKI RELE .....	14
3.6.2 TERMIČNA SLIKA .....	15
3.6.3 KONTAKTNI TERMOMETER .....	17
3.6.4 SUŠILEC ZRAKA .....	19
3.6.5 ODDUŠNIK .....	20
4. DOLOČITEV IN IZBIRA PARAMETROV ZA DISTANČNO ZAŠČITO TRANSFORMATORJA .....	21
4.1 PREDLOG NASTAVITEV DISTANČNE ZAŠČITE .....	21
4.2 PRIMER NASTAVITVE DISTANČNE ZAŠČITE TRANSFORMATORJA 400/115/10,5 kV 300 MVA .....	22
5. MERITVE PARAMETROV ZA DISTANČNO ZAŠČITO TRANSFORMATORJA 28	
5.1 OPIS UPORABLJENIH METOD .....	28
5.1.1 Meritve z Normo D6000 (skladno s SIST EN 60076-1 (11.4):2011) .....	28
5.1.2 Meritve s preizkusno aparaturo Omicron CPC 100 .....	30
5.2 OSNOVNI PODATKI MERJENEGA TRANSFORMATORJA .....	31
5.3 REZULTATI MERITEV IN IZRAČUN NIČNE IMPEDANCE TRANSFORMATORJA .....	36
5.3.1 Meritev nične impedance: VN napajano, NN odprt, TN zaprt, stopnja reg. stikala 1, 13 in 25 z NORMO D6000 (Slika 33) .....	37
5.3.2 Meritev nične impedance: VN napajano, NN zaprt, TN zaprt, stopnja stikala 1, 13 in 25 (Slika 38) .....	40
5.3.3 Meritev nične impedance: VN napajano, NN odprt, TN odprt, stopnja stikala 13 Slika 42 .....	42
5.3.4 Meritev nične impedance: VN napajano, NN zaprt, TN odprt, stopnja stikala 13 (Slika 44) .....	43
5.3.5 Primerjalna tabela rezultatov nične impedance na 400 kV strani transformatorja .....	46
6. ZAKLJUČEK .....	47
LITERATURA IN VIRI .....	48

## KAZALO SLIK

Slika 1: Energetski transformator.....	2
Slika 2: Vloga transformatorjev v EES.....	3
Slika 3: Principielni model transformatorja.....	4
Slika 4: Ameriški trije enofazni (zgoraj) in evropski trifazni, tritebni (spodaj) .....	4
Slika 5: Vezna skupina .....	5
Slika 6: Direktno ozemljeno zvezdišče.....	6
Slika 7: Neozemljeno zvezdišče na 110 kV strani.....	6
Slika 8: Ozemljeno zvezdišče avtotransformatorja.....	6
Slika 9: Meritev na primarni strani .....	7
Slika 10: Meritev na sekundarni strani.....	8
Slika 11: Enočrtne in nadomestne sheme .....	8
Slika 12: Shema zaščite tronavnega transformatorja .....	11
Slika 13: Vezava elektromehanske/statične diferenčne zaščite z vmesnimi transformatorji .....	12
Slika 14: Priključna shema distančne zaščite .....	13
Slika 15: Plinski rele .....	15
Slika 16: Termometer za merjenje temperature navitja.....	16
Slika 17: Termometer za merjenje temperature navitja.....	17
Slika 18: Kontaktni termometer .....	18
Slika 19: Kontaktni termometer .....	18
Slika 20: Sušilec zraka .....	19
Slika 21: Diagram R/X za okvare faza – faza.....	27
Slika 22: Diagram R/X za okvare faza – zemlja .....	27
Slika 23: Shema generatorja .....	28
Slika 24: Merilna oprema.....	29
Slika 25: Vezalna shema opreme .....	29
Slika 26: Priklop CPC 100 na transformator .....	30
Slika 27: Vezalna shema opreme CPC 100.....	31
Slika 28: Tablica transformatorja s podatki transformatorja .....	32
Slika 29: Tablica transformatorja shematski prikaz.....	33
Slika 30: Merilni list transformatorja – končne meritve FAT .....	34
Slika 31: Merilni list - meritve nične impedance .....	35
Slika 32: Vezalna shema priključitve CPC100 in merjenja .....	36
Slika 33: Merilni list 1 - meritve nične impedance .....	37
Slika 34: Merilni list 2 - meritve nične impedance .....	38
Slika 35: VN napajano, NN odprt, TN zaprt, stopnja stikala 13 .....	38
Slika 36: VN napajano, NN odprt, TN zaprt, stopnja stikala 1 .....	39
Slika 37: VN napajano, NN odprt, TN zaprt, stopnja stikala 25 .....	39
Slika 38: Merilni list 3 - meritve nične impedance .....	40
Slika 39: VN napajano, NN zaprt, TN zaprt, stopnja stikala 25 .....	40
Slika 40: VN napajano, NN zaprt, TN zaprt, stopnja stikala 13 .....	41
Slika 41: VN napajano, NN zaprt, TN zaprt, stopnja stikala 1 .....	41
Slika 42: Merilni list 4 - meritve nične impedance .....	42
Slika 43: VN napajano, NN odprto, TN odprto, stopnja stikala 13 .....	42
Slika 44: Merilni list 5 - meritve nične impedance .....	43
Slika 45: VN napajano, NN zaprto, TN odprto, stopnja stikala 13 .....	43

## KAZALO TABEL

Tabela 1: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.1 .....	38
Tabela 2: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.1 .....	39
Tabela 3: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.1 .....	39
Tabela 4: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.2 .....	40
Tabela 5: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.2 .....	41
Tabela 6: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.2 .....	41
Tabela 7: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.3 .....	42
Tabela 8: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.4 .....	43
Tabela 9: podatki za izračun 5.3.1 .....	44
Tabela 10: podatki za izračun 4.3.2 .....	45
Tabela 11: podatki za izračun 5.3.3 .....	45
Tabela 12: podatki za izračun 5.3.4 .....	46
Tabela 13: prikazani rezultati meritev po obeh metodah .....	46

## KRATICE

EES - elektroenergetski sistem  
VN - visoka napetost  
NN - nizka napetost  
TR - transformator  
DV - daljnovod  
TM - tuja mreža  
DZ - distančna zaščita  
TIT - tokovni instrumentni transformator  
NT - napetostni transformator  
TT - tokovni transformatorji  
RTP - razdelilne transformatorske postaje

## SEZNAM SIMBOLOV

$\underline{I}$  - fazor toka, *enote*: A  
 $\underline{U}$  - fazor napetosti, *enote*: V  
 $\underline{Z}$  - fazor impedance, *enote*:  $\Omega$   
 $Z_0$  - nična impedanca, *enote*:  $\Omega$   
 $Z_+$  - pozitivna impedanca, *enote*:  $\Omega$   
 $Z_1$  - impedančni doseg prve stopnje, *enote*:  $\Omega$   
 $\Phi$  - magnetni pretok oz. fluks v magnetnem jedru, *enote*: Wb  
 $u_k$  - kratkostična napetost transformatorja  
 $X_i$  - reaktanca i.-te stopnje, *enote*:  $\Omega$   
 $R$  - ohmska upornost, *enote*:  $\Omega$   
 $R_i$  - ohmska upornost i.-te stopnje, *enote*:  $\Omega$

$R_{iN}$  – ohmska upornost pri enofaznih okvarah i.- te stopnje, *enote*:  $\Omega$

$R_0$  – nična upornost, *enote*:  $\Omega$

$X_0$  – nična reaktanca, *enote*:  $\Omega$

$k_{0x}$  - faktor nične komponente ohmske upornosti, *enote*: (ni)

$k_{0x}$  - faktor nične komponente reaktance, *enote*: (ni)

$S$  - navidezna moč, *enote*: VA, kVA, MVA

$P$  - delovna moč, *enote*: W, kW, MW

$Q$  - jalova moč, *enote*: var, kvar, Mvar



## 1. UVOD

Veliki energetske transformatorji se nahajajo v vozliščih prenosnega EES-a, kot interkonekcijski transformatorji za povezavo med napetostnimi nivoji 400 kV, 220 kV in 110 kV. Interkonekcijski transformatorji so praviloma izvedeni v vezavi zvezda (Y), zvezda (y), trikot (d). Vezno skupino označujemo z YNyn0d5. Za večje ocenjujemo vrednosti nad 100 MVA. Večji energetske transformatorji se nahajajo tudi v elektrarnah kot blok transformatorji, ki povezujejo proizvodne generatorje s prenosnim sistemom (TE-Šoštanj, NE-Krško). Glede na pomembnost v EES-u morajo biti veliki transformatorji zaščiteni z najkvalitetnejšim zaščitnim sistemom, vključno z osnovnimi in rezervnimi zaščitnimi napravami. Te zaščite morajo v popolnosti zadostiti zahtevam po selektivnosti, hitrosti, občutljivosti in zanesljivosti. Za nastavitvev zaščitnega sistema transformatorja ne zadošča samo kvalitetna zaščitna oprema, pač pa potrebujemo še dodatne podatke za optimalno nastavitvev relejnih naprav. Večina podatkov je dosegljivih iz splošnih parametrov elementov EES-a, razen parametrov impedanc transformatorjev, ki pa morajo biti izmerjene. Podatki EES-a se spreminjajo glede na način ozemljitve nevtralne točke – zvezdišča transformatorja od posameznih napetostnih nivojev 400, 220 in 110 kV in vezne skupine. Impedance transformatorjev so določene s konstrukcijo transformatorskih navitij in železnega jedra.

Utemeljitev uporabe distančne zaščite transformatorjev lahko najdemo v strokovnih publikacijah CIGRE (Modern Distance Protection Function and Applications W6 B515 ter v IEEE C37.91-2008).

V nadaljevanju diplomske naloge se bomo osredotočili na obravnavo parametrov ničnih impedanc interkonekcijskega transformatorja, ki so specifično določene od primera do primera in pomembno vplivajo na nastavitvev distančne zaščite.

## 2. IZVEDBE VELIKIH TRANSFORMATORJEV

Energetski transformator je glede na konstrukcijo in delovanje najpreprostejši električni stroj. Energetski transformator je statična naprava za pretvorbo električne energije iz ene oblike v drugo oz. ene napetosti v drugo, npr. iz omrežja napetosti 220 kV v omrežje napetosti 110 kV (Slika 1).

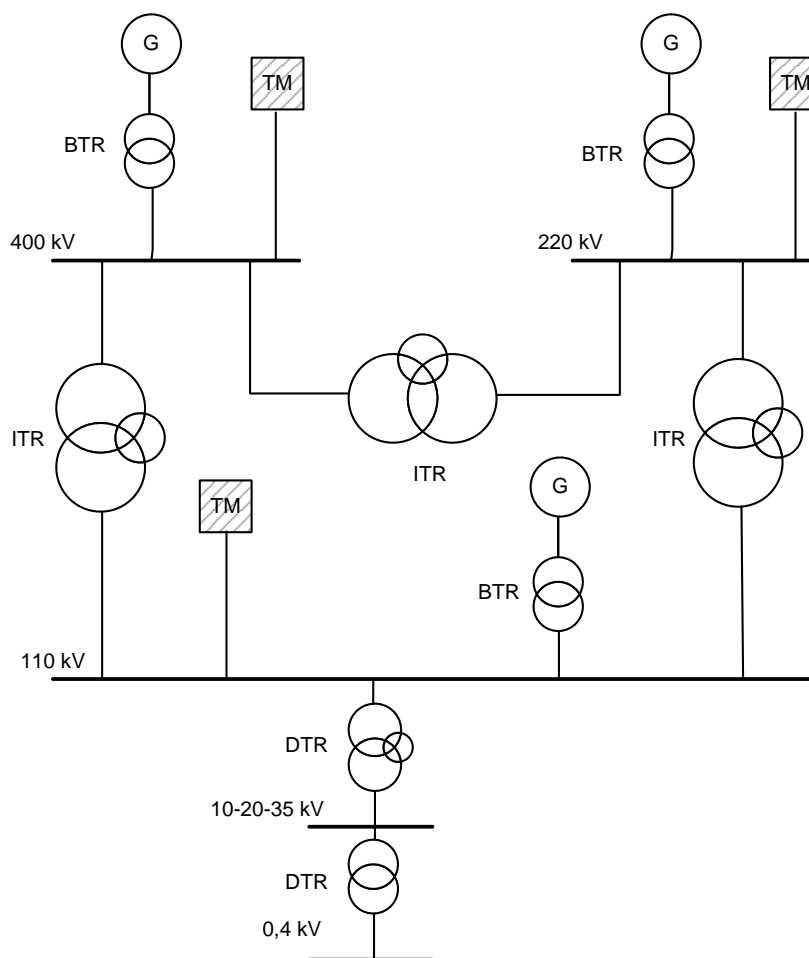


*Slika 1: Energetski transformator  
(vir: Eles, 2000)*

## **2.1 DELITEV IN VLOGA TRANSFORMATORJA V EES-U**

Glede na njihove funkcije v elektroenergetskem sistemu delimo transformatorje v naslednje skupine (Grčar, 1999) (Slika 2):

- Prenosne in interkonekcijske, za moči nad 100 MVA in zelo visokih napetostnih nivojev (110 kV, 220 kV, 400 kV).
- Transformatorje za povezovanje generatorjev z EES-om, od nekaj MVA do 100 MVA.
- Razdelilne, do 63 MVA, Napetostni nivo 110/20 kV.
- Distribucijski za napajanje NN omrežji, do 1.6 MVA moči.



Slika 2: Vloga transformatorjev v EES-u  
(vir: lasten)

Legenda:

- ITR – interkonekcijski transformator
- BTR – blok transformator
- DTR – distribucijski transformator
- TM – tuja mreža

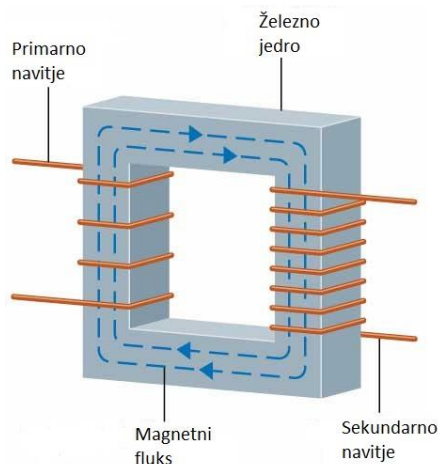
## 2.2 GLAVNI DELI TRANSFORMATORJA

Glavni deli transformatorja so:

- jedro iz trafo pločevine,
- navitja transformatorja (primar, sekundar, terciar),

- kotel, konzervator, hladilniki, skozniki, regulator napetosti, oprema za zaščito in nadzor (Buchholz rele, kontaktni termometer, termo sl., presostati, TIT v skoznikih, ter druga oprema).

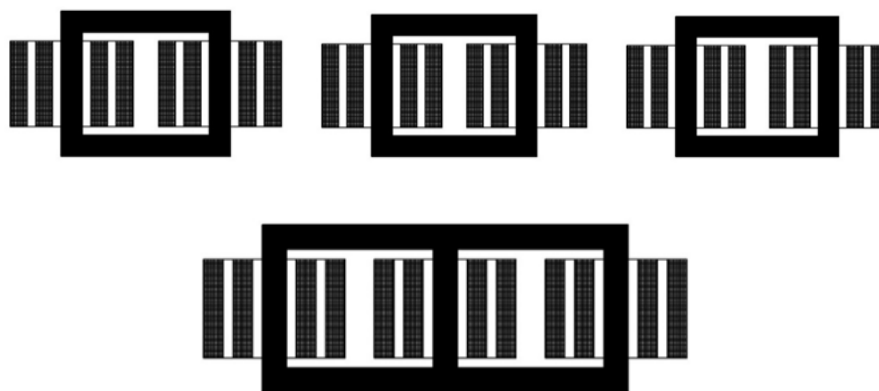
Transformator je grajen z dvema ali več navitji, ki z elektromagnetno indukcijo pretvarja sistem izmenične napetosti in toka v drug sistem napetosti in toka, navadno drugačnih velikosti ter iste frekvence (Slika 3).



Slika 3: Principielni model transformatorja (vir: lasten)

Transformator ima železno (feromagnetno) jedro, ki je sestavljeno iz železne transformatorske pločevine. Ta ima dobre magnetilne lastnosti in pri izmeničnih magnetnih pretokih majhne specifične izgube. Na železnem jedru sta nameščeni primarno in sekundarno navitje. Navitja so običajno izdelana iz izoliranih bakrenih vodnikov, ki so dimenzionirani glede na moč, za katero je transformator grajen.

Glede na izvedbo železnega jedra ločimo enofazne (ameriški tip). Tri enofazne transformatorje povežemo v trifazni sistem (Slika 4). Običajna izvedba v Evropi je tri ali pet stebno jedro.

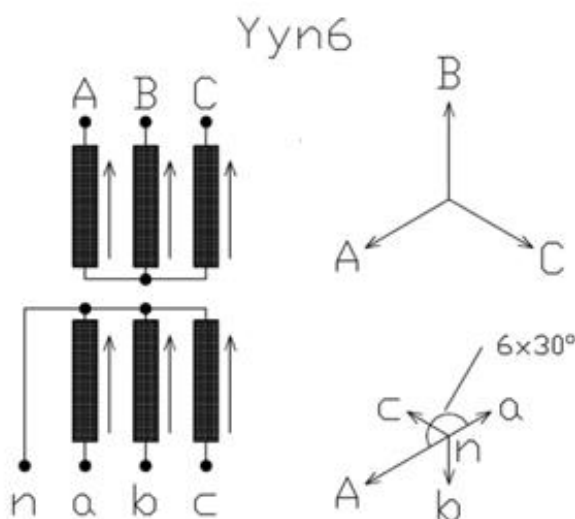


Slika 4: Ameriški trije enofazni (zgoraj) in evropski trifazni, tritestbrni (spodaj) (vir: lasten)

Ločimo dvonavitne in tronavitne transformatorje. Dvonavitni se običajno nahajajo v elektrarnah v vezavi Yd5. V prenosnem omrežju so tronavitni (primer YNyn0d5).

## 2.3 VEZAVE NAVITIJ TRIFAZNIH TRANSFORMATORJEV

Vezave posameznih navitij označujemo s črkami, visokonapetostno navitje z veliko črko, ostala navitja z malimi črkami. Navitja trifaznih transformatorjev so običajno vezana v simetrične vezave, kot so zvezda (oznaka y), trikot (oznaka d) ali cik-cak (oznaka z) (Slika 5). Med fazorji iste faze lahko pri transformaciji pride do faznih premikov, ki so odvisni od vezave transformatorja. Premik med fazorjem napetosti na priključkih VN navitja in med fazorjem napetosti na priključkih ostalih navitij označujemo z urnimi števkami, ki jih imenujemo številke vezalne skupine, ki določajo kot po številčnici ure. Fazni premik dobimo, če urno številko pomnožimo s  $30^\circ$ .

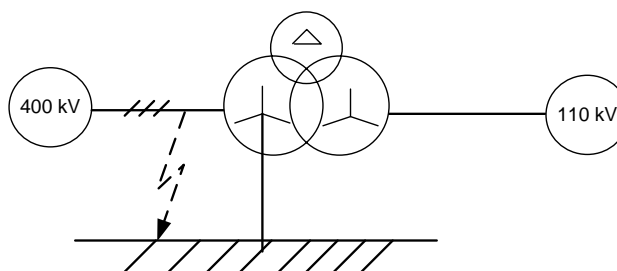


Slika 5: Vezna skupina  
(vir: lasten)

## 2.4 OZEMLJITVE ZVEZDIŠČ TRANSFORMATORJEV

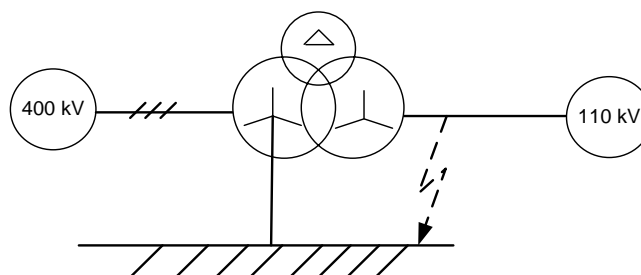
Glede na način ozemljitev zvezdišč transformatorjev v Sloveniji pa ločimo:

- Direktno ozemljena (400 kV in 220 kV) zvezdišča so direktno ali togo ozemljena (Slika 6), enofazne okvare na 400 kV se zaključujejo preko zvezdišča 400 kV transformatorja.



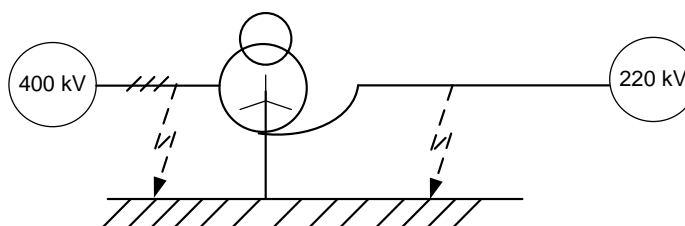
Slika 6: Direktno ozemljeno zvezdišče  
(vir: Grčar, 1999)

- Če na 110 kV zvezdišče ni ozemljeno (praksa EES Slovenija) se zemeljskostični tok zaključuje preko ozemljenih transformatorjev v 110 kV omrežju (Slika 7).



Slika 7: Neozemljeno zvezdišče na 110 kV strani  
(vir: Grčar, 1999)

- Interkonekcijski transformatorji 400/220 kV so v Sloveniji izvedeni kot avtotransformatorji. To pomeni, da ima transformator skupno zvezdišče in je 220 kV navitje del 400 kV navitja (Slika 8).



Slika 8: Ozemljeno zvezdišče avtotransformatorja  
(vir: Grčar, 1999)

Pri avtotransformatorju je en del navitja skupen primarni in sekundarni strani. V skupnem delu navitja teče razlika tokov obeh strani in prerez vodnika je lahko manjši. Tudi prerez jedra iz transformatorske pločevine je lahko temu ustrezno zmanjšan. Prihranek pri materialu je tem večji, čim manj se napetosti primarne in sekundarne strani med seboj razlikujeta, torej čim bliže je napetostna prestava

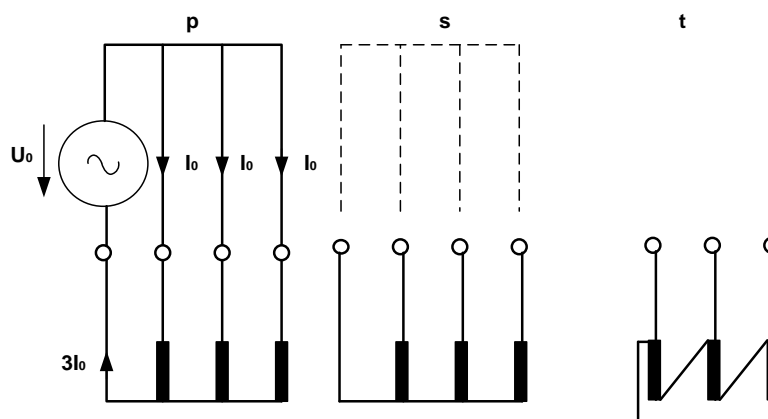
vrednosti 1. Ker je uporabljenega manj materiala, so izgube v bakru in železu manjše, izkoristek pa boljši, kot pri transformatorju z dvema galvanjsko ločenima navitjema.

## 2.5 NIČNE IMPEDANCE TRANSFORMATORJEV

Nične impedance trifaznih transformatorjev so odvisne od vezave navitij in od zgradbe jedra – trojedrni, petjedrni, enofazni transformator. V omrežju lahko nični sistem obstoja le takrat, kadar je najmanj eno navitje transformatorja vezano v zvezdi in če je zvezdiščna točka vezana z zemljo direktno ali preko induktivne ali ohmske upornosti. Izjema je avto-transformator, kjer nična impedanca obstaja tudi, če ni izvedena ozemljitev z zvezdiščem (Roeper, 1987).

Za enočrtno nadomestno shemo ničnega sistema lahko izračunamo zahtevane nične impedance s pomočjo izmerjenih ničnih impedanc praznega teka in ničnih kratkostičnih impedanc.

- a) Meritev na primarni strani p, nična impedanca praznega teka  $Z_{0pl}$  (sekundarno navitje je odprto) (Slika 9)

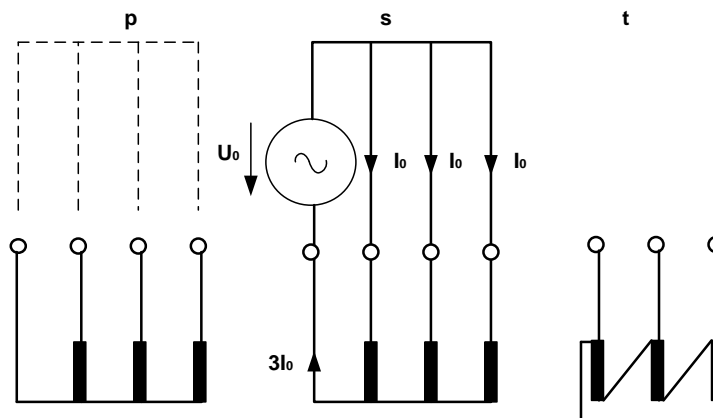


Slika 9: Meritev na primarni strani  
(vir: Roeper, 1987)

Legenda:

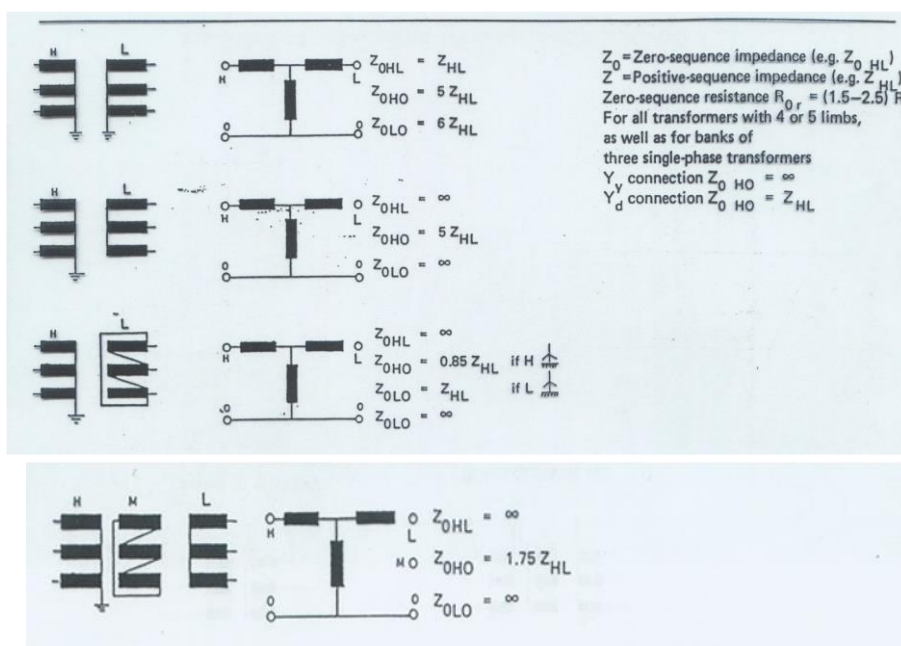
- p – primarna stran transformatorja
- s – sekundarna stran transformatorja
- t – terciarna stran transformatorja
- $U_0$  – napetost ničnega zaporedja
- $I_0$  – tok ničnega zaporedja

- b) Meritev na sekundarni strani s,  
 Nična impedanca praznega teka  $Z_{\text{opk}}$  (primarno navitje p odprto) (Slika 10)



Slika 10: Meritev na sekundarni strani  
 (vir: Roeper, 1987)

Na Sliki 11 so za najpogostejše vezave transformatorjev z dvema in tremi navitji prikazane enopolne in nadomestne sheme za sofazni/nični sistem (Phaff, 1970).



Slika 11: Enočrtna in nadomestna shema  
 (vir: Phaff, oktober 1970)



### 2.5.1 NIČNE IMPEDANCE TRANSFORMATORJEV

Izkustvene ocene impedanc so dobljene v starejši literaturi tovarne BBC Švica (Phaff, 1970).

$Z_0$  v tabeli je izražena nična impedanca primar sekundar (HL) s pomočjo pozitivne impedance transformatorja  $Z = Z_+$ , ki jo lahko izračunamo iz znane kratkostične napetosti transformatorja  $u_k$  v [%], napetosti [kV] in moči  $S$  [MVA].

$$Z [\Omega] = \frac{u_k [\%] * U^2 [\text{kV}]}{100 * S [\text{MVA}]}$$

Točna vrednosti  $Z_0$  v vezavi zvezda z ozemljenim zvezdiščem je lahko le izmerjena vrednost posameznega navitja. Ozemljeno je lahko VN ali NN zvezdišče. Če pa zvezdišče ni ozemljeno, je vrednost  $Z_0$  blizu neskončnosti. Če obstaja navitje v vezavi trikot, se vrednosti zelo spremenijo.

Za transformatorje s 4 in 5 stebri in vezavo YNyn brez trikota so pričakovane vrednosti  $Z_0$  neskončne ne glede na ozemljitve zvezdišč. Enako velja za ameriški tip transformatorjev, če so trije enofazni transformatorji vezani v zvezdo.

Za transformatorje s 4 in 5 stebri in vezavo YNd (zvezda – trikot) so vrednosti  $Z_0$  skoraj enake kot za evropski tristebni tip transformatorja.

Glede na večino velikih transformatorjev, ki so v obratovanju v slovenskem omrežju imamo vezavi Yd ali pa YNynd z izenačevalnim navitjem (terciar), vezanim v trikot.

Na primeru transformatorja v prenosnem omrežju 400/110/10,5 kV je terciarno navitje vezano v trikot tretjinske moči napetosti 31,5 kV namenjeno uravnavanju manjših faznih nesimetrij v omrežju.

Omrežje 400 kV je togo ozemljeno, to pomeni, da so vsa zvezdišča povezana z zemljo v transformatorskih postajah. Ozemljitev z nizko upornostjo je v stikališčih 400 kV dobljena s pomočjo zakopane ozemljitvene mreže (bakrenih vrvi ali FeZn valjanca večjega preseka).

Nična impedanca je s stališča nastavitve distančne zaščite smiselna le za 400 kV stran transformatorskega prispevka tokov v primeru faznih stikov z zemljo ali prebojih dozemne izolacije, ker 110 kV stran zvezdišč ni ozemljena.

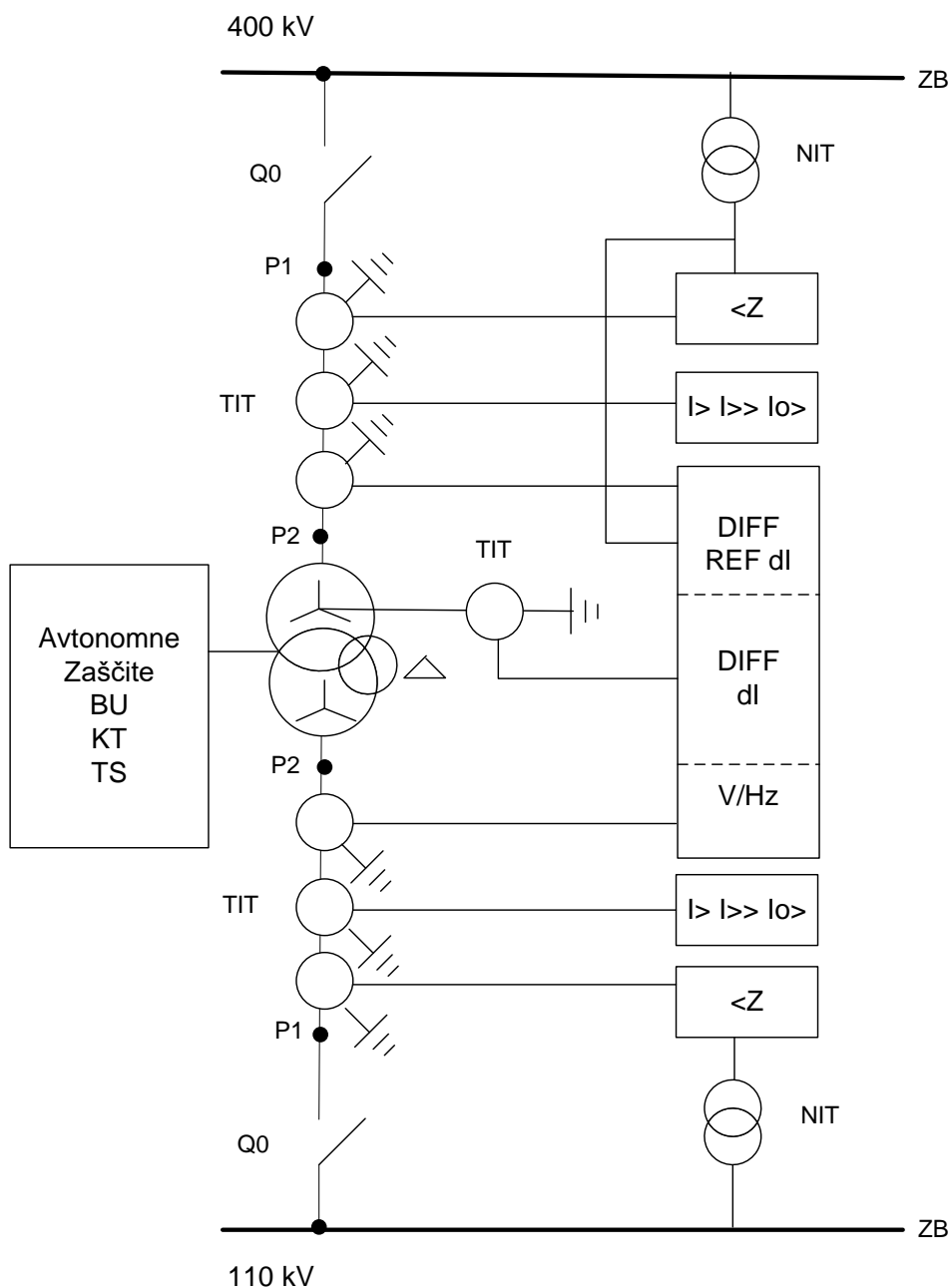
### 3. ZAŠČITNI SISTEM INTERKONEKCIJSKEGA TRANSFORMATORJA

Primer splošne sheme zaščite tronavitnega transformatorja (Slika 12) obsega:

- diferenčno zaščito,
- nadtokovno zaščito na primarni strani TR,
- nadtokovno zaščito na sekundarni strani TR,
- nadtokovno zaščito na terciarni strani TR,
- distančno zaščito na primarni strani TR,
- distančno zaščito na sekundarni strani TR,
- zemeljskostično diferenčno zaščito,
- zaščito pri previsokem fluksu  $V/Hz$ .

Avtonomne zaščite transformatorja:

- Buchholz rele,
- kontaktni termometer,
- termo slika.



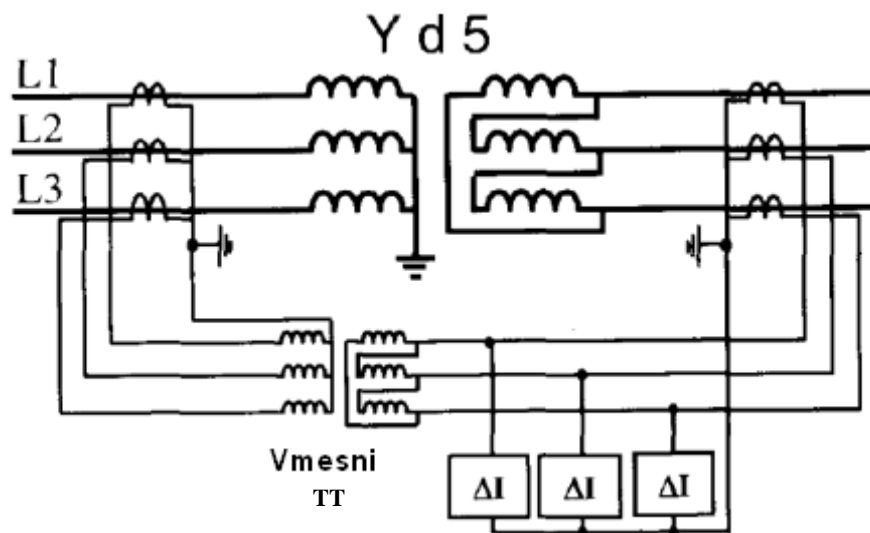
Slika 12: Shema zaščite tronavitnega transformatorja (vir: lasten)

### 3.1 DIFERENČNA ZAŠČITA

To je najpogosteje uporabljena vrsta kratkostične zaščite. Področje delovanja zaščite sega od tokovnikov na primarni strani do tokovnikov na sekundarni strani. Delovanje temelji na Kirchhoffovem zakonu vozliščnih tokov. Uspešno delovanje je odvisno od upoštevanja nekaterih posebnih zahtev in pogojev obratovanja transformatorja:

- primarni in sekundarni tokovi se v normalnem obratovanju razlikujejo po amplitudi in fazi;
- pri vklopu neobremenjenega transformatorja, ki povzroči velik vklopni tok, je potrebno delovanje zaščite preprečiti;
- prevzbujanje transformatorja, ki ga spremlja naraščanje magnetnega pretoka, ne sme sprožiti delovanja zaščite;
- potrebno je zagotoviti absolutno selektivno delovanje;
- zanesljivo delovanje zaščite dobimo za stike med primarnim in sekundarnim navitjem ter za medfazne stike, medtem ko so lahko diferenčni tokovi pri medovojnih stikih bistveno manjši. V primeru zemeljskih stikov dobimo dovolj velike diferenčne toke le v primeru ozemljenih zvezdišč oziroma če je zemeljski stik dovolj oddaljen od zvezdišča.

Primer vezave diferenčne zaščite (Ziegler, G., 2005) je na Sliki 13.



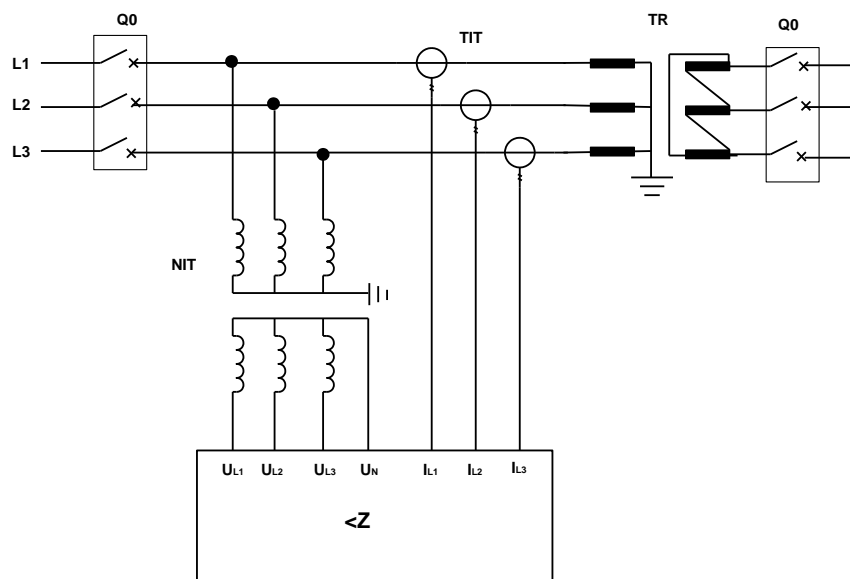
Slika 13: Vezava elektromehanske/statične diferenčne zaščite z vmesnimi transformatorji  
(vir: Ziegler, 2005)

### 3.2 DISTANČNA ZAŠČITA

Distančna zaščita velikih transformatorjev je običajno le rezervna zaščita za primer odpovedi bodisi zaščite na DV-ju ali diferenčne zaščite pri okvarah v transformatorju oziroma znotraj območja diferenčne zaščite. To vključuje TIT, skoznjike na izvodih TR-ja ali del vodnikov zunanjih povezav med TIT-i in skoznjiki Slika 14. Vgradnja je

upravičena zaradi ekonomskega izračuna, saj je vrednost takih TR-je več milijonov evrov in trajna poškodba zaradi zatajitve zaščite ne predstavlja samo velikega stroška, ampak zmanjšanje zanesljivosti omrežja v obratovanju. Izdelava novega TR-ja ali popravilo, prevoz in montaža, lahko traja celo leto. Zlasti so ranljive napajalne točke v postajah, kjer je vgrajen en sam tak TR v postaji.

Distančna zaščita potrebuje za delovanje informacije toka in napetosti, iz katerih se izračunava impedanco  $Z$  okvare, kar v bistvu predstavlja za DV-je tudi oddaljenost okvare – kratkega stika od vgrajenih TIT-ih in NIT-ih.



Slika 14: Priključna shema distančne zaščite  
(vir: lasten)

Distančna zaščita vedno deluje za medfazne in trifazne okvare v območju primarne ali sekundarne strani, medtem ko mora biti za enofazne okvare – zemeljske stike – transformatorsko zvezdišče ozemljeno. Če ni, je impedanca okvare  $Z_0$  blizu neskončnosti in moramo vgraditi zaščito zbiralk ali drugo zaščito, ki prepozna visoko ohmske stike z zemljo, da lahko hitro izklopimo tudi TR-je odklopnike. Rešitve so možne z releji, ki delujejo na principu  $3U_0$ , ali nadtokovno – podnapetostno zaščito, vendar moramo releje časovno zakasniti toliko, da prej izklopijo vse distančne zaščite na drugem koncu DV-ja in ostane zemeljski stik napajan samo še iz TR-ja preko male vrednosti kapacitivnega toka (IEEE, 2008).

### 3.3 NADTOKOVNA ZAŠČITA

Nadtokovne releje uporabljamo pri večjih transformatorjih kot rezervno zaščito, pri manjših enotah pa kot osnovno kratkostično zaščito. Pri radialnem napajanju

namestimo rele samo na primarno stran, medtem ko pri dvostranskem napajanju namestimo rele tudi na sekundarno stran.

Če transformator ni ozemljen zadostujeta releja v dveh fazah. Pri ozemljenih zvezdiščih pa predvidimo releje v vseh treh fazah. Vzbujaalni tok releja nastavimo na vrednost 1,1–1,2 maksimalnega dopustnega bremenskega toka. Časovno zakasnitev je potrebno uskladiti z ostalimi zaščitami. Običajne vrednosti so v področju od 0,4 s do 0,6 s nad nastavitvijo distančne zaščite.

### **3.4 ZEMELJSKOSTIČNA DIFERENČNA ZAŠČITA**

Pri neozemljenih oziroma visoko uporabno ozemljenih transformatorjih steče pri zemeljskem stiku relativno mali tok okvare, ki ne sproži delovanja diferenčne ali nadtokovne zaščite. Kljub temu pa je transformator potencialno ogrožen zaradi povišanja linijskih napetosti v ostalih fazah, kar poveča verjetnost nastanka kratkega stika preko dvojnega zemeljskega stika. Zaradi tega je potrebno predvideti posebno zaščito za ugotavljanje zemeljskih stikov, ki je lahko izvedena kot selektivna (deluje le pri stikih znotraj transformatorja) ali pa neselektivna, ki deluje pri stikih v segmentu galvansko povezanih omrežij.

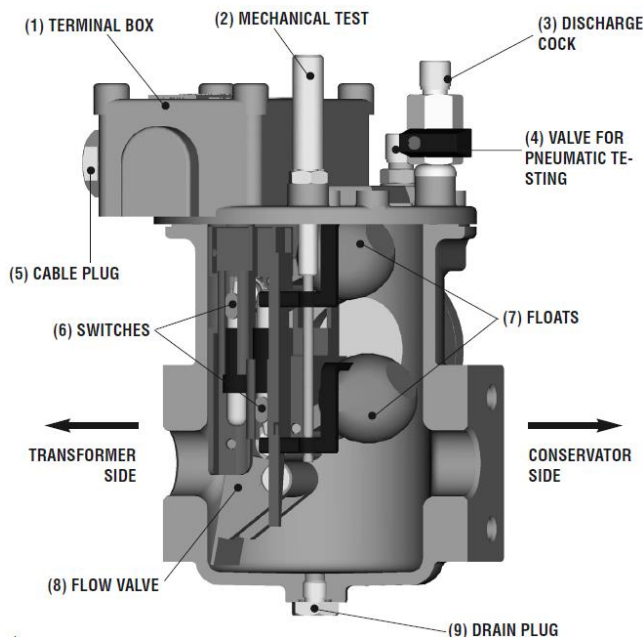
### **3.5 ZAŠČITA PRI PREVISOKEM FLUKSU V/Hz**

Transformator deluje na načelu vzajemne indukcije med primarnim in sekundarnim navitjem. Indukcija povzroča nenehno spreminja magnetnega pretoka, ki povezuje dve navitji. Magnetni pretok v navitjih je neposredno sorazmeren z inducirano napetostjo in obratno sorazmeren s frekvenco in številom ovojev navitja. Pri povišanem razmerju V/Hz posebna funkcija zaščite zazna nenormalno stanje in alarmira operaterje v centrih vodenja ali izklopi TR.

### **3.6 AVTONOMNE ZAŠČITE**

#### **3.6.1 PLINSKI RELE**

Plinski rele, znan pod nazivom Buchholz rele, je osnovni zaščitni element močnostnega transformatorja. Vgrajen je v cevi, ki povezuje transformatorski kotel s konzervatorjem. Med normalnim obratovanjem transformatorja je napolnjen z oljem. V primeru okvare v transformatorju, ko se razvijejo plini, se ti dvignejo proti konzervatorju in ujamejo v zgornji komori releja. Posledično se nivo olja v releju zniža in zgornji plovec sproži alarmni signal. Plini pred sprožitvijo alarma ne uhajajo v konzervator. Naslednja pomembna funkcija plinskega releja je, da deluje pri hitrem pretoku olja iz transformatorskega kotla proti konzervatorju. Če hitrost olja preseže nastavljeno vrednost, loputa v releju sproži stikalo za izklop transformatorja. Slika 15.



Slika 15: Plinski rele  
(vir: Kolektor Etra)

Na zgornjem delu naprave se nahajajo tudi: ventil s pipico, z navojem 1/8", za izpust plinov (3), ventil za preizkušanje delovanja releja s stisnjenim zrakom (4) in igla za mehanski preizkus alarmnega in izklopnega kontakta (2). Vgrajena je tudi kabelska uvodnica M20. Na spodnji strani se nahaja čep za izpust olja (9). Rdeča puščica na zgornjem delu ohišja označuje smer montaže (od transformatorja k konzervatorju). (vir: Kolektor Etra intera literatura, popravek: 3, 2015)

### 3.6.2 TERMIČNA SLIKA

Termometer meri temperaturo najtoplejše točke v navitju transformatorja. Temperaturo navitja je težko neposredno meriti, zato so razvili instrument, s pomočjo katerega je mogoče indirektno preslikati termično sliko temperature.

Termometer za merjenje temperature navitja (Slika 16 in Slika 17) je opremljen sondo-tipalom (1), ki je nameščena v žepu na pokrovu transformatorja. Sonda je povezana z ohišjem instrumenta s pomočjo gibljive kapilarne cevi (2). Kapilarna cev je povezana z merilnim mehkom instrumenta (3). Merilni sistem je napolnjen s tekočino, ki pri spremembi temperature spreminja volumen. Kompenzacijski meh (4) preko vzvoda deluje na merilni meh, ki kompenzira spremembe v temperaturi okolja.

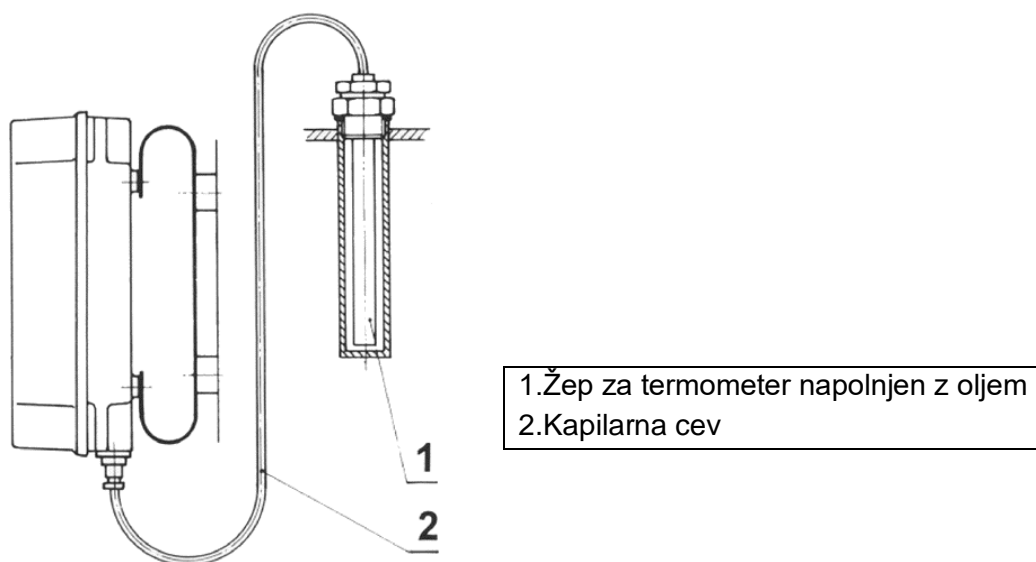
Znotraj instrumenta je grelni upor (5), napajan s tokom, ki je v sorazmerju z bremenskim tokom transformatorja. Grelni upor je z vezjo (6) povezan na priključne sponke (12). Tako temperatura grelnega upora, kot tudi temperatura v žepu na

pokrovu transformatorja učinkujeta na merilni meh, čigar gibanje prenese vzvod (7) na kazalec (8) in os (9) s stikali (10 in 11). Na voljo so izvedbe z dvema ali štirimi stikali in vsakega izmed njih lahko nastavimo popolnoma neodvisno od drugih.

Instrument je opremljen tudi s kazalcem maksimuma, ki se pomika skupaj s kazalcem (8), ko temperatura narašča. Maksimalni kazalec tako zabeleži maksimalno doseženo temperaturo. S pomočjo navadnega izvijača ga lahko z zunanje strani instrumenta ponovno nastavimo. Na dnu ohišja se nahajata dve ali tri kabelske uvodnice za vstopajoče kable. Na ohišju je tudi odprtina za ventilacijo.

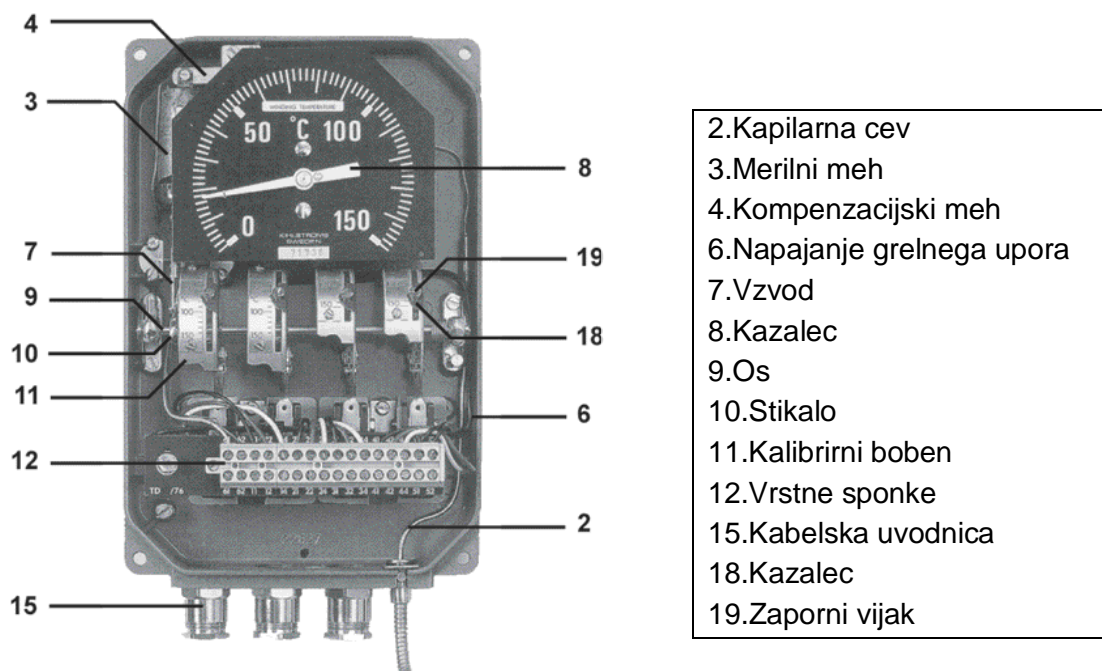
Grelni upor napaja tokovni transformator obremenjenega navitja transformatorja. Tako je temperaturni prirastek na grelnem uporu sorazmeren prirastku temperature nad najvišjo temperaturo olja. Na drugi strani pa je sonda instrumenta nameščena v najtoplejšem olju transformatorja in tako zaznava najtoplejšo temperaturo olja. Merilni meh reagira tako na porast temperature grelnega upora, ki ustreza temperaturnemu padcu navitja nad najtoplejšo točko olja, kakor tudi na najvišjo temperaturo olja. Na ta način instrument kaže temperaturo v najtoplejšem delu navitja, t. i. temperaturo najtoplejše točke ("hot spot").

Toplotna časovna konstanta naprave je enaka časovni konstanti navitja. Tako indikator podaja pravo "termično sliko" temperature navitja v odvisnosti od časa (vir: Kolektor Etra interna literatura, popravek: 1, 2001).



Slika 16: Termometer za merjenje temperature navitja  
(vir: Kolektor Etra)





Slika 17: Termometer za merjenje temperature navitja  
 (vir: Kolektor Etra)

### 3.6.3 KONTAKTNI TERMOMETER

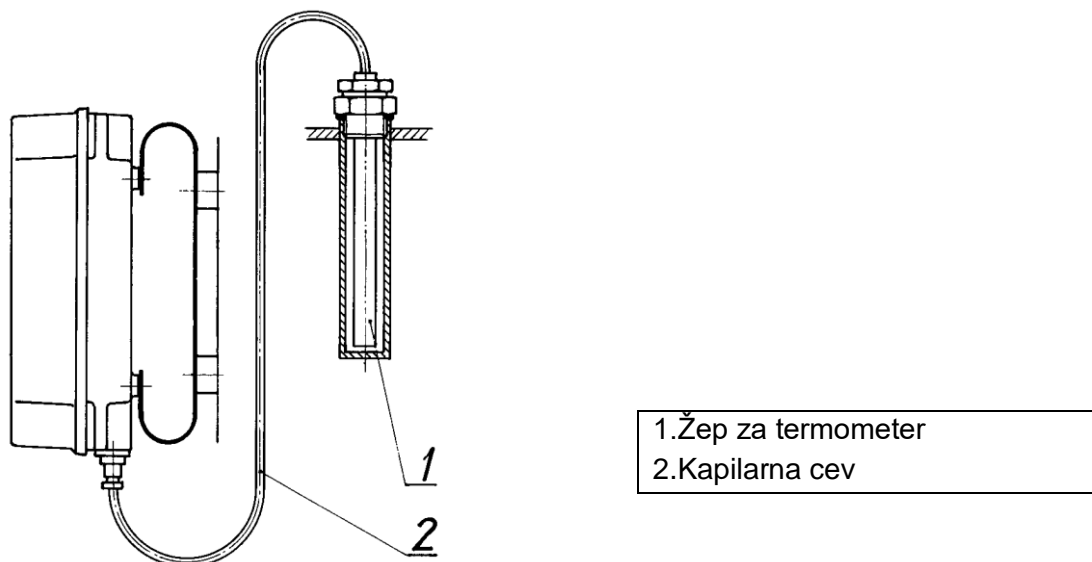
Kontaktni termometer je robusten vremensko odporen instrument, ki se uporablja za indikacijo temperature olja v transformatorju. Opremljen je z dvema, tremi ali štirimi mikrostikali za zaščito transformatorja in krmiljenje hladilnega sistema.

Kontaktni termometer (Slika 18 in slika 19) je opremljen z občutljivo sondo (1), ki je nameščena v žepu, na pokrovu transformatorja. Sonda je povezana z ohišjem instrumenta s pomočjo fleksibilne kapilarne cevi (2). Kapilarna cev je povezana z merilnim mehkom instrumenta (3). Merilni sistem je napolnjen s tekočino, ki pri spremembi temperature spreminja volumen. Kompenzacijski meh (4) preko vzvoda deluje na merilni meh, ki kompenzira spremembe v temperaturi okolja.

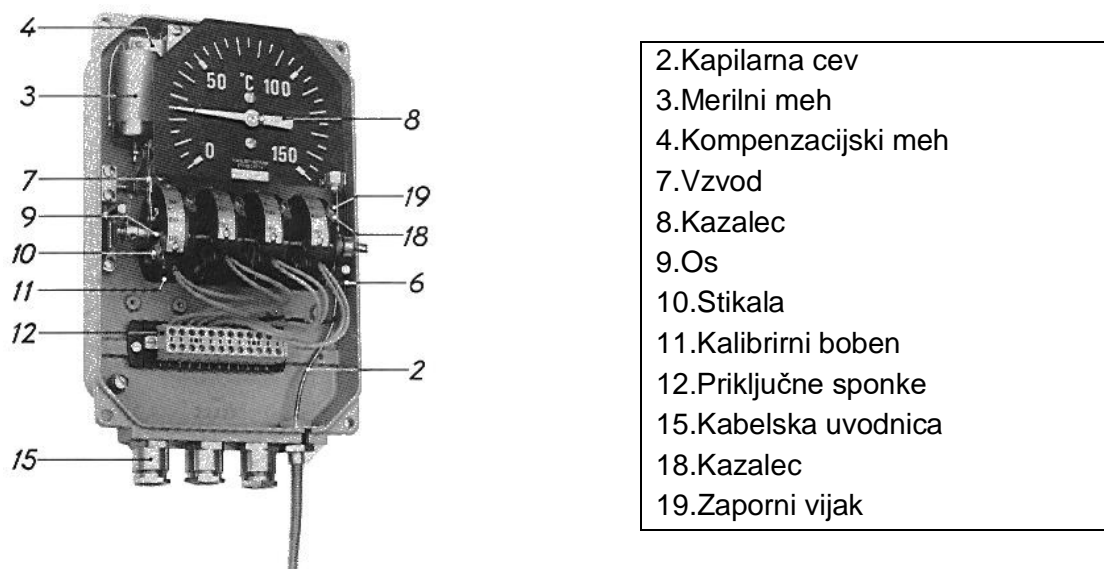
Temperatura v žepu na pokrovu transformatorja učinkuje na merilni meh, čigar gibanje vzvod (7) prenese na kazalec (8) in na os (9) s stikali (10 in 11). Na voljo so izvedbe z dvema ali štirimi stikali in vsakega izmed njih lahko nastavimo popolnoma neodvisno od drugih. Zmogljivost stikal je 10 A 30 V/0,1 A 110 V/0,05 A 220 V DC in 15 A 220 V AC.

Instrument je opremljen tudi s kazalcem maksimuma, ki se pomika skupaj s kazalcem (8), ko temperatura narašča. Maksimalni kazalec tako zabeleži maksimalno doseženo temperaturo. S pomočjo navadnega izvijača ga lahko z zunanje strani instrumenta ponovno nastavimo. Na dnu ohišja se nahajata dve ali tri

kabelske uvodnice za vstopajoče kable. Na ohišju je tudi odprtina za ventilacijo. (vir: Kolektor Etra interna literatura, 1997)



Slika 18: Kontaktni termometer  
(vir: Kolektor Etra)



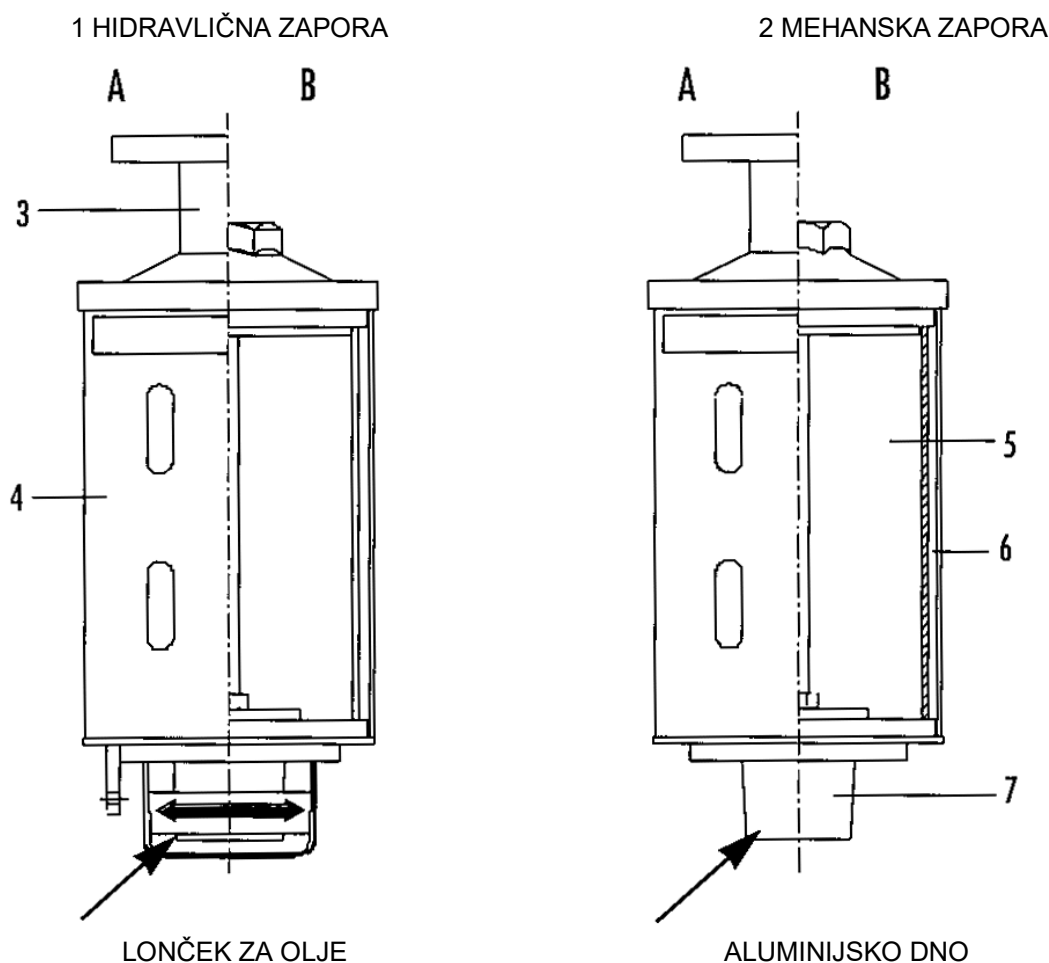
Slika 19: Kontaktni termometer  
(vir: Kolektor Etra)

### 3.6.4 SUŠILEC ZRAKA

Naprava ima dve funkciji:

- vpija vlago iz zraka vsesanega v transformator v obdobju krčenja dielektrika in
- preprečuje dihanje pri malih spremembah obremenitve in na ta način izolira vse oksidaciji podvržene proizvode od stalnega kontakta z zrakom.

Naprava (Slika 20) je sestavljena iz prozornega, na olje odpornega valja (6), v katerem se nahaja material za vpijanje vlage (5) in oljne zapore, ki omejuje dihanje (7). Običajno sredstvo za vpijanje vlage je ultra mikro porozen silikagel oranžne barve. Zmožnost vpijanja vlage je 30 % aktivne teže silikagela pri temperaturi 20° C in 100 % vlažnosti.



Slika 20: Sušilec zraka  
(vir: Kolektor Etra)

Zgornji (3) in spodnji (7) del je izdelan iz korozijsko odporne aluminijeve litine. Prozorni valj je zaščiten proti udarcem s pomočjo zaščitne obloge iz nerjavečega jekla (4), na kateri so odprtine za vizualno kontrolo stanja silikagela.

Zaporni sistem na spodnjem delu sušilca (7) preprečuje stalen kontakt zraka s silikagelom. Zaporni sistem je lahko mehanski ali hidravlični in omogoča prehod zraka v obe smeri (vstop in izstop) zgolj pri razliki tlakov v transformatorju ter izven njega. Padec tlaka zraka pri prehodu skozi sušilec znaša: 0,3 kPa pri vstopu, in 0,5 kPa pri izstopu zraka.

Med silikagelom in zapornim sistemom je labirintni sistem, ki ima dvojno funkcijo, da enakomerno razprši vstopajoči zrak in da prepreči, da bi drobcji silikagela poškodovali zaporni sistem. Pri stalni temperaturi transformatorja je silikagel izoliran od atmosfere preko oljne zapore.

V obdobju segrevanja transformatorja povzroča raztezanje dielektrične tekočine določen nadpritisk v transformatorju. Zato pride do izrivanja olja v posodi oljne zapore in zrak iz transformatorja odhaja v atmosfero. V obdobju ohlajevanja transformatorja je postopek obrnjen. V posodi oljne zapore se pojavi pod pritisk, svoboden pretok zraka pa preprečuje olje. Ves vstopajoči zrak v olju se prečisti in osuši pri prehodu skozi silikagel. (vir: Kolektor Etra interna literatura, popravek: 1, 2015)

### 3.6.5 ODDUŠNIK

Oddušnik (varnostni ventil) omogoča kvalitetno tlačno zaščito kotla transformatorja, napolnjenega z dielektrikom. V primeru kratkega stika v transformatorju se ob preskoku električnega loka ustvari velika količina plinov, ki povzroči hiter porast pritiska v kotlu. Če se ta pritisk v hipoma ne zniža na dopustno vrednost, lahko kotel počni in se razlije hladilna tekočina. Varnostni ventil odpre membrano v času nekaj milisekund. Vstop vode in tujkov ni mogoč, saj se varnostni ventil pri padcu nadpritiska v kotlu takoj zapre. Nazivni tlak, pri katerem se varnostni ventil odpre, izberemo v odvisnosti od trdnosti kotla.

Primeren je za delovanje v temperaturnem območju od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $+100^{\circ}\text{C}$ . Varnostni ventil je opremljen z vizualnim pokazateljem delovanja. V primeru, ko deluje, se v sredini ohišja, zgoraj, pridvigne rdeč gumb. Obenem z vizualnim pokazateljem delovanja se sprožijo tudi električna stikala. Za postavitev v normalni položaj moramo rdeči gumb ročno potisniti navzdol, prav tako moramo resetirati električna mikrostikala. (vir: Kolektor Etra interna literatura 2015)

## 4. DOLOČITEV IN IZBIRA PARAMETROV ZA DISTANČNO ZAŠČITO TRANSFORMATORJA

### 4.1 PREDLOG NASTAVITEV DISTANČNE ZAŠČITE

Distančni releji so vgrajeni na obeh straneh transformatorjev 220/110 kV ali 400/220 kV ali 400/110 kV.

1. Stopnja štiti zbiralnice, če ni vgrajena zaščita zbiralk. Ščiti tudi zatajitev zaščite katerega koli DV-ja v območju 20 % impedance najkrajšega DV-ja.

Moderni releji imajo praviloma poligonalno karakteristiko in ločeno nastavitev za enofazne in ločeno za medfazne okvare. Pri enofaznih okvarah upoštevamo faktor zemeljskega stika najkrajšega DV-ja zaradi  $Z_0$  ( $X_0$ ,  $R_0$ ).

$X1 = 0,2 X_{dv}$  (najkrajšega voda) z zakasnitvijo 0,3 s

$R1 = X1$  za medfazne okvare

$R1N = 3X1$  za enofazne okvare

Za zelo kratke vode minimalna upornost zaradi loka ne sme biti manjša od vrednosti, ki jo izračunamo po Warringtonovi enačbi.

2. Stopnja je rezervna zaščita za primer zatajitev zaščite ali odklopnika na najdaljšem DV-ju vključenem na istih zbiralkah kot TR. Zaradi dodatnih napajanj je toleranca povečana na 120 %.

$X2 = 1,2 X_{dv}$  (najdaljšega) z zakasnitvijo 1,2 s za 400 kV in 1,5 s za 110 kV stran

$R2 = X2$  za medfazne okvare

$R2N = 3X2$  za enofazne okvare z upoštevanjem faktorja zemeljskega stika  $k_0$  DV-ja. Omejitev predstavlja vrednosti 80 % minimalnih obratovalnih impedanc. Pri enofaznih okvarah upoštevamo faktor zemeljskega stika najdaljšega DV-ja zaradi  $Z_0$  ( $X_0, R_0$ )

3. Stopnja je rezervna zaščita za transformatorske zaščite in je usmerjena v transformator.

$X3 = R3 = R3N = 0,85 X_{tr}$  z zakasnitvijo 0,2 s (če zvezdišče ni ozemljeno)

$R3N = 3X3$  (za ozemljeno zvezdišče TR na 400 kV strani)

Če obratuje več TR-jev paralelno, se upošteva napako zaradi dodatnega napajanja (samo za 1. in 2. stopnje, ki gledajo v DV).

V novih tehnologijah, npr. numeričnih zaščitah, je nastavitev grupe prilagojena dejanskemu obratovalnemu stanju. Kadar obratuje TR sam, so vrednosti opisane kot zgoraj, če pa obratuje več TR-jev paralelno, nastavitve povečamo sorazmerno moči paralelnih TR-jev.

Praviloma z distančnimi stopnjami (Z1, Z2, Z3) ne segamo preko TR-ja v drug napetostni nivo. Kontroliramo zlasti dosege 2 stopenj v R smeri na sosednjih DV-jih, da ne posegamo v območje obratovalnih impedanc in pretokov maksimalnih moči.

4. Vzbujanje: – nadtokovno  $I > = 2 I_{n\ tr}$ -za medfazne okvare  
za zemeljskostične okvare  $3I_0 = I_n > = 0.4 I_{n\ tr}$   
– podimpedančno vzbujanje  $Z < U/2I_{ntr}$   
– vzbujanje lahko uporabimo kot izklop v rezervni stopnji ( $t \geq 2s$ )

5. Na strani neozemljenega zvezdišča moramo dodati zaščito zbiralk ali zemeljskostično zaščito ( $U > 3U_0$ ), ker distančna zaščita visoko ohmskih okvar ne more zaznati. Nastavitev 40 %  $U_n$  z zakasnitvijo 2 s.

## 4.2 PRIMER NASTAVITVE DISTANČNE ZAŠČITE TRANSFORMATORJA 400/115/10,5 KV 300 MVA

Za nastavitev distančne zaščite moramo najprej poznati podatke pripadajoče primarne in sekundarne opreme. Ta mora biti projektno prilagojena na sekundarne vrednosti TIT-a in NT-ja, izbranemu zaščitnemu sistemu, izklopni logiki, sistemom komunikacij ter konceptom pomožnega napajanja DC-ja za različne zaščitne naprave.

Primarna in sekundarna oprema je običajno že obstoječa, zato se nastavitev zaščite določa glede na podatke iz danega stanja v objektu in pripadajočim napravam TR-ja in DV-ja v okolici ter trenutnim obratovalnim razmeram v omrežju.

### Primer opreme v 400/110 kV RTP

Transformator: interkonekcijski s tremi navitji  
Moč 300/300/100 MVA,  
Napetosti: 400 z regulacijo  $\pm 15\%$ /115/10,5 kV  
Nazivni tok na srednjem odcepu 433/1506/5499 A  
Vezna skupina YNyn0d5 je pomembna za diferenčno zaščito  
Napetost kratkega stika  $uk_{12}$  13,6 % na srednjem odcepu primar/sekundar  
Pomembna informacija je tudi fiksna ozemljitev TR zvezdišča 400 kV.

Oprema na 400 kV strani:

Tokovni transformatorji TT-a za zaščito so vgrajeni v vsaki fazi L1, L2, L3, 3. jedro s prestavo: 800/1 A. Zaščitno jedro TT-a spoznamo po oznakah na tablici, npr. 10P20.

Napetostni transformatorji NT-ja za zaščito so vgrajeni v vsaki fazi L1, L2, L3, 3. navitje s prestavo:  $400\ 000/\sqrt{3}/100/\sqrt{3}$  V.

Zaradi usmerjenosti distančne zaščite je pomembno, na kateri sekundarni sponki zaščitnega jedra (s1, s2) so ozemljeni tokovni transformatorji in povezani v zvezdišče. Ozemljitve sekundarnih sponk je izvedena v priključni omarici na samih TIT-ih tudi zaradi varnosti. Znano je, da so tokovni tokokrogi smrtno nevarni ob odprtih sekundarnih sponkah. Pri tokovnih ožičenjih zaščite namreč uporabljamo 4 vodno vezavo, tako da je za vsoto tokov  $3I_0$  od TIT-a do releja dovolj ena sama žila v kablu. Vse kabelske povezave v VN stikališčih morajo biti oklopljene z zaščitnim plaščem in ozemljene zaradi manjšega vpliva induciranih napetosti višjih frekvenc. Standardi s tega področja se nanašajo na kriterije EMC, SIST IEC/TR61000-5-6:2004.

Posamezne stopnje distančne zaščite lahko usmerimo proti transformatorju ali proti zbiralkam v omrežje, odvisno kako so fizično priključene primarne sponke TIT-a (P1, P2) v TR polju v VN stikališču. Pomembno je, da distančna zaščita gleda, npr. v 1. in 2. stopnji v omrežje, v 3. stopnji pa v transformator in služi kot rezerva za diferenčno zaščito.

TR je napajan iz DV-ja 400 kV; dolžine 31 km s parametri (vir: EIMV. 2008. Ref. št. 1636. Izračuni kratkostičnih razmer)

$$R_+ + jX_+ = (0,93 + j9,89) \Omega$$

$$R_0 + jX_0 = (4,44 + j28,86) \Omega$$

Nekateri releji zahtevajo informacijo za faktor nične komponente  $k_{0X}$ ,  $k_{0R}$  in kratkostični kot  $\varphi_k$  za DV in TR.

$$K_{0X} = \frac{(X_0 - X_+)}{3X_+}$$

$$K_{0R} = \frac{(R_0 - R_+)}{3R_+}$$

$$\varphi_k = \arctg * \frac{X_+}{R_+}$$

Impedanca transformatorja:

$$Z_+ = \frac{u_k * U^2}{100 * S} = \frac{13,6 * 400^2}{100 * 300} = 72,53 \Omega$$

$Z_o$  ( $X_o$ ,  $R_o$ ) je za določeno vezno skupino treba izmeriti. V našem primeru je bilo izmerjeno  $X_{o\text{ izm}} = 106,6 \Omega$

### **Primarne nastavitve DZ 400 kV v smeri zbiralk in omrežja**

1. Stopnja služi za zaščito zbiralk 400 kV in rezerva za odpoved distančne zaščite ali odklopnika DV-ja pri bližnjih okvarah. Usmerjenost v zbiralke 400 kV.
2. Poligonalno karakteristiko za medfazne in enofazne okvare kreiramo iz parametrov

$$X1 = 0.2 X_{dv} = 0.2 \times 9.89 = 1.98 \Omega$$

$$R1 = X1 = 1.98 \Omega$$

$$R1n = 3X1 = 5.94 \Omega$$

$$\text{časovna zakasnitev } t1 = 0,3 \text{ s}$$

3. Stopnja služi kot rezerva za odpoved distančne zaščite ali odklopnika najdaljšega DV-ja. Smer zbiralke 400 kV

$$X2 = 1.2 X_{dv} = 1.2 \times 9.89 = 11,87 \Omega$$

$$R2 = X2 = 11,87 \Omega$$

$$R2n = 3X2 = 35,61 \Omega$$

$$\text{časovna zakasnitev } t2 = 1,2 \text{ s}$$

4. Stopnja služi za rezervo zaščite zbiralk. Usmerjenost v TR

$$X3 = R3 = 0,85 X_{tr} + 0,85 Z_{tr} = 0,85 \times 72,53 = 61,65 \Omega$$

$$R3n = 0,85 X_{otr} = 0,85 \times 106,6 = 90,61 \Omega$$

$$\text{časovna zakasnitev } t3 = 0,2 \text{ s}$$

Sekundarne vrednosti se prilagodijo glede na faktorje prestavnega razmerja TT-a, NT-ja.

$$Kz = \frac{PTT}{PNT} = \frac{800}{4000} = 0,02$$

### **Primarne nastavitve DZ 110 kV v smeri zbiralk in omrežja**

Oprema na 110 kV strani

Tokovni transformatorji (TT) za zaščito vgrajeni v vsaki fazi L1, L2, L3. 3. jedro s prestavo: 2000/1 A. Zaščitno jedro TT-a spoznamo po oznakah na tablici, npr. 10P20.



Napetostni transformatorji NT-ja so za zaščito vgrajeni v vsaki fazi L1, L2, L3. 3. navitje s prestavo:  $110\ 000/\sqrt{3}/100/\sqrt{3}\text{ V}$

Stopnje lahko usmerimo proti transformatorju ali proti zbiralkam v omrežje, odvisno kako so fizično priključene primarne sponke TT-ja (P1, P2). Pomembno je, da distančna zaščita gleda npr. v 1. in 2. stopnji v omrežje, v 3. stopnji pa v transformator in služi kot rezerva za diferenčno zaščito.

DV 110 kV; omrežje

Najkrajši DV dolžine 5,6 km s parametri – [EIMV – Ref. št. 1636 Izračuni kratkostičnih razmer Slovenije/2008]

$$R_+ = 0,70\ \Omega, X_+ = 2,14\ \Omega, R_0 = 1,85\ \Omega, X_0 = 7,31\ \Omega$$

Najdaljši DV dolžine 26,3 km s parametri

$$R_+ = 3,13\ \Omega, X_+ = 10,62\ \Omega, R_0 = 8,21\ \Omega, X_0 = 28,09\ \Omega$$

Nekateri releji zahtevajo informacijo za faktor nične komponente  $k_{0x}$ ,  $k_{0r}$  in kratkostični kot  $\varphi_k$  za DV in TR.

$$K_{0x} = \frac{(X_0 - X_+)}{3X_+}$$

$$K_{0r} = \frac{(R_0 - R_+)}{3R_+}$$

$$\varphi_k = \arctg * \frac{X_+}{R_+}$$

Impedanca TR-ja 110 kV strani:

$$Z_+ = \frac{u_k * U^2}{100 * S} = \frac{13,6 * 110^2}{100 * 300} = 5,48\ \Omega$$

$Z_0$  ( $X_0$ ,  $R_0$ ) je za določeno vezno skupino treba izmeriti. V našem primeru smo izmerili  $X_{0\ izm} = 26480\ \Omega$ , kar je praktično neskončno.

### **Primarne nastavitve DZ 110 kV v smeri zbiralk in omrežja**

1. Stopnja služi za zaščito zbiralk 110 kV in rezerva za odpoved distančne zaščite ali odklopnika DV-ja pri bližnjih okvarah. Usmerjenost v zbiralke 110 kV

Poligonalno karakteristiko za medfazne okvare kreiramo iz parametrov

$$X1 = 0,2 \quad X_{dv} = 0,2 \times 2,14 = 0,43 \quad \Omega$$

$$R1 = 2 \quad \Omega \text{ zaradi upornosti loka}$$

$$R1n = 3R1 = 6,0 \quad \Omega \text{ (za enofazne okvare zaščita ni funkcionalna, ker zvezdišče ni ozemljeno. V RTP-ju mora biti vgrajena zaščita zbiralk)}$$

$$\text{časovna zakasnitev } t1 = 0,3 \text{ s}$$

2. Stopnja služi kot rezerva za odpoved distančne zaščite ali odklopnika najdaljšega DV-ja. Smer zbiralke 110 kV in DV 110 kV.

$$X2 = 1,2 \quad X_{dv} = 1,2 \times 10,62 = 12,74 \quad \Omega$$

$$R2 = X2 = 12,74 \quad \Omega$$

$$R2n = 3X2 = 38,23 \quad \Omega \text{ (za enofazne okvare zaščita ne bo delovala, ker zvezdišče ni ozemljeno. V RTP-ju mora biti vgrajena zaščita zbiralk)}$$

$$\text{časovna zakasnitev } t2 = 1,5 \text{ s}$$

3. Stopnja služi za rezervo zaščite zbiralk. Usmerjenost v TR

$$X3 = R3 = 0,85 \quad X_{+tr} \sim 0,85 \quad Z_{+tr} = 0,85 \times 5,48 = 4,66 \quad \Omega$$

$$R3n = 0,85 \quad X_{otr} = 0,85 \times 5,48 = 4,66 \quad \Omega \text{ (nima funkcije)}$$

$$\text{časovna zakasnitev } t3 = 0,2 \text{ s}$$

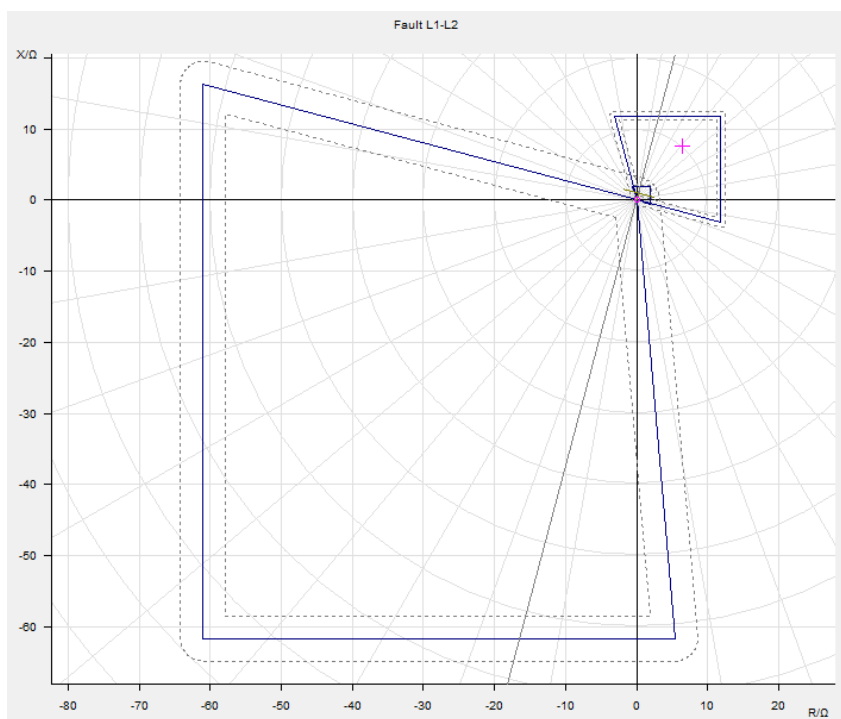
Sekundarne nastavitve se prilagodijo s faktorjem prestavnega razmerja  $K_z$

$$K_z = \frac{PTT}{PNT} = \frac{2000}{1100} = 1,82$$

### **Grafična predstavitev stopnjevalnega načrta zaščite transformatorja**

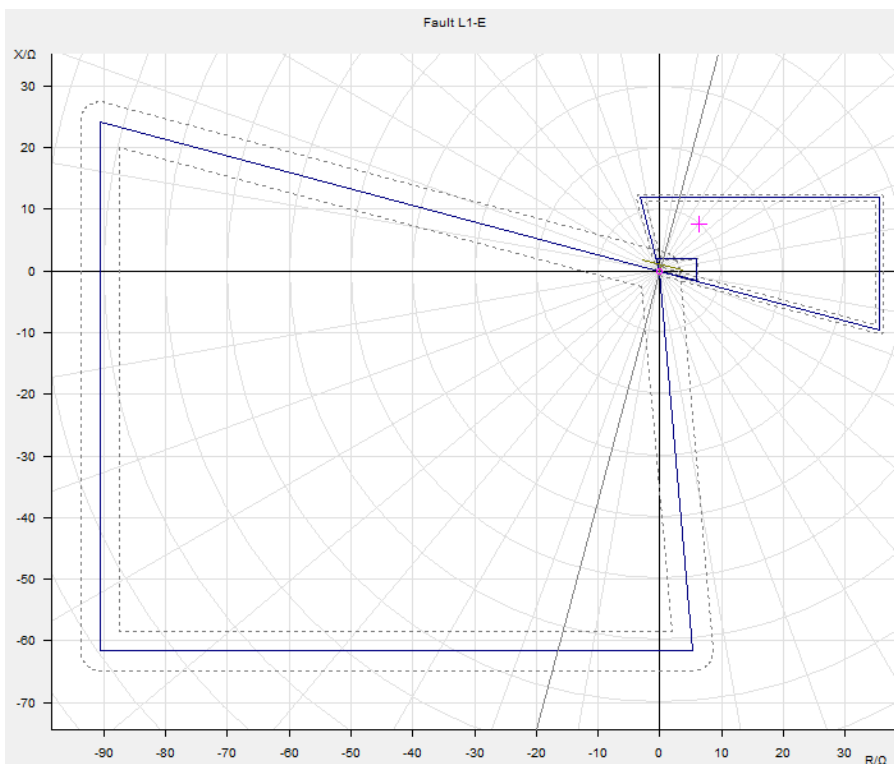
Nastavitev numeričnega releja distančne zaščite na 400 kV strani.

Poligonalna karakteristika – diagram R/X za okvare faza – faza



Slika 21: Diagram R/X za okvare faza – faza  
(vir: Omicron)

Poligonalna karakteristika – diagram R/X za okvare faza – zemlja



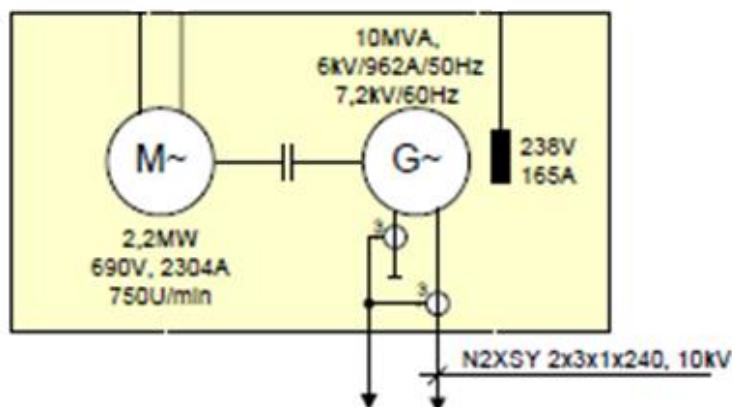
Slika 22: Diagram R/X za okvare faza – zemlja  
(vir: Omicron)

## 5. MERITVE PARAMETROV ZA DISTANČNO ZAŠČITO TRANSFORMATORJA

### 5.1 OPIS UPORABLJENIH METOD

#### 5.1.1 Meritve z Normo D6000 (skladno s SIST EN 60076-1 (11.4):2011)

Tok, napetost in izgube v bakru merimo s trifaznim širokopasovnim močnostnim analizatorjem, ki je za to meritev vezan v enofaznem načinu merjenja. Kot izvor napetosti uporabljamo generatorjevo napetost, Slika 23. Pri meritvi uporabljamo sinhronski Siemensov generator moči 10 MVA, napetostjo 6 kV in frekvenco od 0 do 60 Hz. Motor generatorja je moči 2 MW in je frekvenčno krmiljen. Trifazni indukcijski motor s kratkostično kletko ima nazivno moč 2200 kW, nazivno napetost 690 V, frekvenco 50 Hz, nazivni tok 2x1150 A in faktorjem moči 0,83. Hitrost rotorja je 745 obratov na minuto z navorom 28201 Nm.



Slika 23: Shema generatorja  
(vir: lasten)

Frekvenca mora biti enaka nazivni frekvenci merjenja. Izhodna napetost generatorja je zvezna od 0 do 6 kV, po potrebi pa se lahko transformira do 120 kV. Vrednost toka in napetosti se meri s preciznimi merilnimi tokovnimi in napetostnimi pretvorniki.

Meritev izvedemo približno s tretjino nazivnega toka navitja, če to dopušča trikotno navitje oziroma če dopušča merilna oprema. Če ima merjeno navitje regulacijsko stikalo, se meritve izvede na nazivni stopnji stikala in na obeh krajnih stopnjah. Časovno trajanje meritve naj bo kratko, da se izognemo pretiranemu segrevanju kovinskih delov konstrukcije transformatorja.

Spisek merilne opreme, Slika 24:

- trifazni širokopasovni močnostni analizator,
- merilni napetostni pretvorniki,
- merilni tokovni pretvorniki.



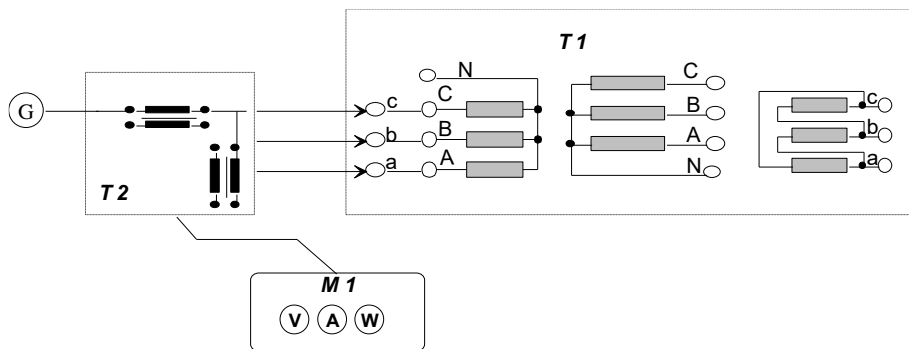
Trifazni širokopasovni močnostni analizator



Merilni napetostni in tokovni pretvorniki

Slika 24: Merilna oprema (vir: lasten)

Vezava merilne opreme:



Slika 25: Vezalna shema opreme (vir: Kolektor Etra)

Legenda:

T1 – merjeni transformator

T2 – merilni transformatorji

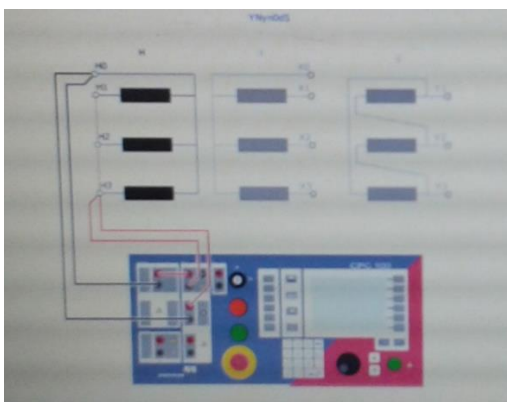
M1 – merilni instrument

### 5.1.2 Meritve s preizkusno aparaturo Omicron CPC 100

Instrument CPC 100 je načeloma namenjen meritvam na terenu, saj je vsa oprema na mobilnem vozičku. S CPC 100 lahko v osnovi pomerimo le prestavo in upornost transformatorja, za ostale meritve, kot so merjenje tokovnih in napetostnih transformatorjev, tangens delta, nična impedanca pa moramo uporabiti druge nastavitve. Pri meritvi nične impedance v programu Primary Test Manager (PTM) vstavimo vhodne podatke transformatorja, kot so: nazivna moč, nazivna napetost, nazivni tok, stik transformatorja in nastavimo stopnje regulacijskega stikala. Nastavimo lahko primarno ali sekundarno stran merjenja impedance. Potem nastavimo opcijo za merjenje nične impedance, pri kateri pa lahko nastavimo tok meritve maksimalno 3 A. Pri določitvi stika transformatorja in števila navitij, nam program avtomatično poda narisano shemo priključitve transformatorja za meritev nične impedance. Če želimo meriti na različnih stopnjah stikala, moramo vsakokrat nastaviti napetost željene stopnje in premakniti regulacijsko stikalo na željeno stopnjo merjenja (Slika 25).

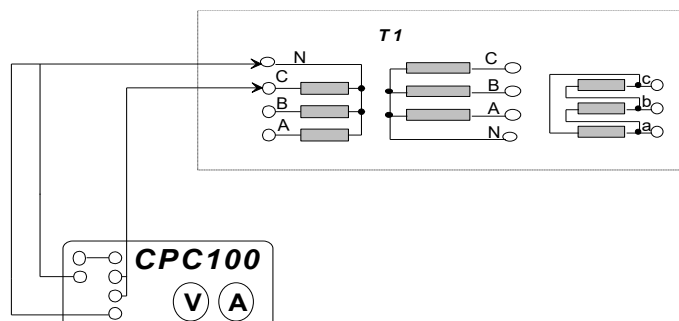
Spisek merilne opreme:

- Preizkusna aparatura Omicron CPC 100



Slika 26: Priklop CPC 100 na transformator  
(vir: Omicron)

- Vezava merilne opreme (Slika 27):



Slika 27: Vezalna shema opreme CPC 100  
(vir: lasten)

#### Legenda:


T1 – merjeni transformator

CPC 100 – merilna aparatura

## 5.2 OSNOVNI PODATKI MERJENEGA TRANSFORMATORJA

Transformator za RTP Divača, serijska številka 81671, ki je bil izdelan leta 2016. Transformator ima na primarni strani nazivno moč 300 MVA in nazivno napetost 400 kV. Na sekundarni strani pa ima nazivno moč 300 MVA in nazivno napetost 115 kV. Terciarno navitje ima nazivno moč 100 MVA in nazivno napetost 10,5 kV. Stopnja izolacije na VN strani je 325 kV, na NN strani je 230 kV in na TN strani 50 kV. Nazivni tok na VN strani je 433 A, na NN strani pa 1506,1 A. Transformator ima stik YNyn0d5, tip magnetnega kroga je 5-stebni. Skupna masa transformatorja z oljem je 323 ton, od tega je teža olja 76 ton. Možnost hlajenja transformatorja je z načinom ONAN in ONAF. ONAN tip hlajenja je način, pri katerem se transformator hladi samo preko hladilnega sistema montiranega na transformatorju. S tem, ko olje kroži skozi hladilni sistem, se olje ohlaja. ONAF tip hlajenja pa je način, pri katerem poleg hladilnega sistema pomagajo še ventilatorji, ki še dodatno hladijo sistem. Za ONAF tip hlajenja ima montiranih 12 ventilatorjev.

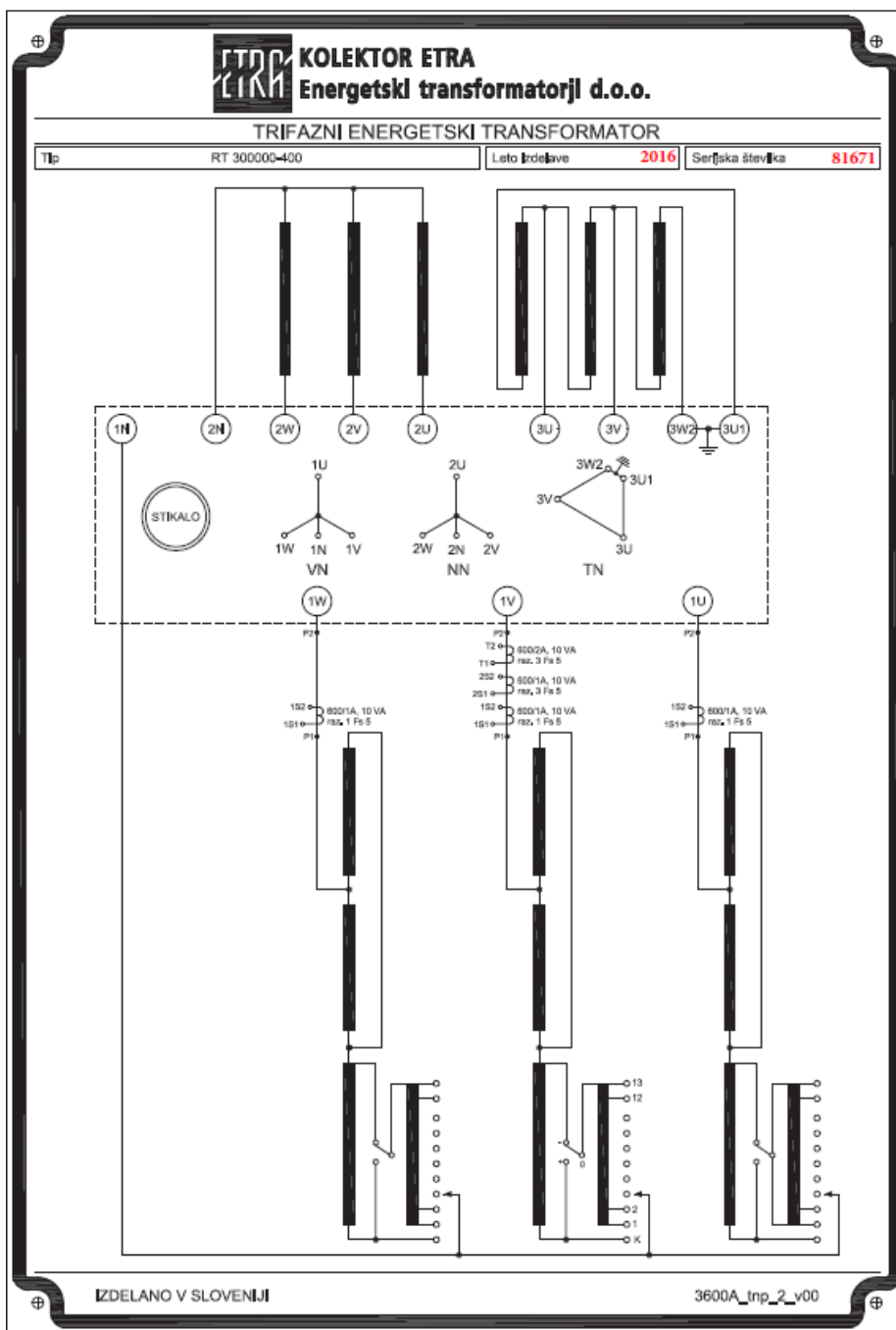
Regulacijsko stikalo je vgrajeno na VN strani proizvajalca MR ima 25 stopenj, med katerimi je razmerje 1,25 %, serijska številka stikala je 1757521. Tablica transformatorja je prikazana na Sliki 28.

 <b>KOLEKTOR ETRA</b> <b>Energetski transformatorji d.o.o.</b>			
TRIFAZNI ENERGETSKI TRANSFORMATOR			
Tip RT 300000-400		Leto izdelave <b>2016</b>	
Nazivna moč [kVA]		Serijska številka <b>81671</b>	
Način hlajenja VN NN TN		VN stran - 1U, 1V, 1W, 1N	
ONAF 300000 300000 100000		Izolacijski nivo [kV] - 1U, 1V, 1W SI 1050 / LI 1425 / AC 630	
ONAN 180000 180000 60000		- 1N LI 750 / AC 325	
Prestavno razmerje [kV] 400 ±12x1,25% / 115 / (10,5)		Položaj	
Standard SIST EN 60076		Napetost [V]	
Frekvenca [Hz] 50		Tok [A]	
Vezna skupina YNyn0+d5		Oznake na izbranih tokih	
Kratkoiščna napetost [%] - 300 MVA		Inverzno področje	
1 <b>14,73</b> 13 <b>13,36</b> 25 <b>12,45</b>		0 +	
Kratkoiščne izgube - Pk [kW] - 300 MVA		0 -	
1 <b>545,099</b> 13 <b>524,262</b> 25 <b>561,218</b>			
Izgube prostega teka - P <sub>s</sub> [kW] <b>107,444</b>			
PEI [%] <b>99,842</b> pri k <sub>na</sub> <b>0,453</b>			
Električna moč hladilnega sistema pri prostem teku - P <sub>cs</sub> [kW]			
Tip olja / Standard NYNAS - Nyltro 4000X / IEC 60296			
Tip stikala MR VRG III 1000 Y-170/E 14273G			
Serijska številka stikala <b>1757521</b>			
Minimalna temperatura okolice [°C] -25			
Maksimalna temperatura okolice [°C] +40			
Nadtemperatura navitja [K] 65			
Nadtemperatura olja [K] 60			
Maksimalna nadtemperatura navitja [K] 78			
Čas trajanja kratkega stika [s] 2			
Material navitja Baker			
Masa bakra 41130 kg			
Material jedra Hladno valjana transformatorska pločevina			
Masa pločevine 125480 kg			
Masa olja 76050 kg			
Masa aktivnega dela 187400 kg			
Skupna masa 323000 kg			
Transportna masa (brez olja) 223000 kg			
		NN stran - 2U, 2V, 2W, 2N	
		Izolacijski nivo [kV] LI 550 / AC 230	
		Napetost [V]	
		Tok [A]	
		ONAN ONAF	
		115000 903,7 1506,1	
		TN stran - 3U2, 3W1	
		Izolacijski nivo [kV] LI 125 / AC 50	
		Nastavitev termične slike	
		Naprava Hot spot gradient [K] pri ONAF	
		TS faza 1V <b>18,5</b>	
		Konzervator z zračno blazinco. Transformatorsko olje ne vsebuje PCB-jev. Kotel, konzervator, stikalo in hladilni sistem so dimenzionirani za polni vakuum.	
IZDELANO V SLOVENIJI		3600A_inp_1_v00	

Slika 28: Tablica transformatorja s podatki transformatorja (vir: Kolektor Etra)

Na Sliki 29 je shematski prikaz trifaznega energetskega transformatorja z vezno skupino in regulacijskim stikalom.







Slika 29: Tablica transformatorja shematski prikaz (vir: Kolektor Etra)

Uporabljeni standardi:


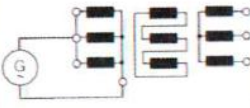
- SIST EN 60076-1 (11.4): 2011 merjenje impedanc kratkega stika
- SIST EN 60076-1: 2011 (odstavek 10) tolerance pri meritvah
- SIST EN 60076-8: 1997 preračun temperatur impedanc kratkega stika in nične impedance
- EU 548/2014 evropska direktiva za majhne, srednje in velike transformatorje

Na Sliki 30 so na merilnem listu transformatorja rezultati končnih meritev FAT v tovarni proizvajalca transformatorja.

 <b>KOLEKTOR</b> <small>KOLEKTOR ETRA d.o.o.</small>		<b>MERILNI LIST TRANSFORMATORJA</b> <b>TRANSFORMER TEST REPORT</b> <b>Končne meritve - FAT</b> <b>Factory acceptance tests - FAT</b>			
Naročnik: Purchaser:	Proizvajalec: Manufacturer:	Preizkušeno po standardu: Tested in accordance with:	Leto izdelave: Year of manufacture:		
	KOLEKTOR ETRA ENERGETSKI TRANSFORMATORJI d.o.o.	SIST EN 60076	2016		
TEHNIČNI PODATKI TECHNICAL DATA					
Transformator: Transformer:		Regulacijsko stikalo: Tap-changer:	Komandna omarica reg. stikala: Tap-changer motor drive unit:		
Tip: Type:	<b>RT 300000-400</b>				
Tovarniška št.: Serial number:	<b>81671</b>				
Številka načrta: Diagram number:					
Winding; Wicklung:		VN - HV	VN <sub>N</sub> - HV <sub>N</sub>		
		NN - LV	TN - TV		
Stopnja izolacije: Insulation level:	Um [kV]	420	170	123	24
	SI [kV]	1050	--	--	--
	LI [kV]	1425	750	550	125
	AC [kV]	630	325	230	50
Nazivna moč: Rated power:	Sr [kV A]	300.000		300.000	100.000
Nazivna napetost: Rated voltage:	Ur [V]	+ 12 x 1,25%		115.000	(10.500)
		- 12 x 1,25%			
Nazivni tok: Rated current:	Ir [A]	433,0		1.506,1	5.498,4
Nazivna frekvenca: Rated frequency:	50 Hz	Število faz: Number of phases: 3	Vezna skupina: Vector group: YNyn0+d5	Tip hlajenja: Cooling mode: ONAN / ONAF	Tip izolacijskega olja (transf.): Type of isolation oil (transf.): Nynas Nytro 4000 X
Skupna masa [kg]: Total weight [kg]:	323.000	Teža olja [kg]: Weight of oil [kg]:	76.050	Tip mag. kroga: Core design: 5 stebni / 5 limbs	Tip izolacijskega olja (stikalo): Type of isolation oil (OLTC): Nynas Nytro 4000 X
NOTES: BEMERKUNGEN: <b>ONAN 180 MVA</b> <b>ONAF 300 MVA</b>					
The test was carried out in presence of: Abnehmer:			Tested by: Geprüft von:  Ljubljana:  Checked by: Kontrolliert:		
I: 205/16					
 <b>KOLEKTOR ETRA Energetski transformatorji d.o.o.</b> <small>Štandrova 10, 1001 Ljubljana, p.p. 4956, Slovenija</small> <small>tel: ++386 1 5302 800 fax: ++386 1 5302 830 http://www.kolektor-etra.si</small>		→ 1 / 2			
<small>→ 81671.docx / s= 06/01/2017</small>		<small>→ LM2020 / s= P.Š. 30.07.97 - Verzija 0</small>			

Slika 30: Merilni list transformatorja – končne meritve FAT  
(vir: Kolektor Etra)

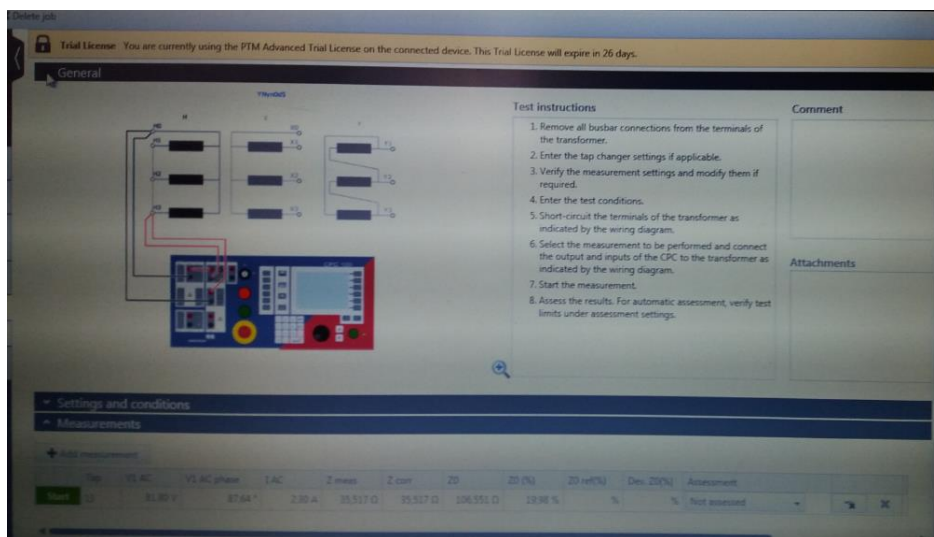
Na Sliki 31 so na merilnem listu transformatorja rezultati končnih meritev nične impedance v tovarni proizvajalca transformatorja.

 <b>KOLEKTOR</b> <small>KOLEKTOR ETRA d.o.o.</small>		<b>MERILNI LIST TRANSFORMATORJA</b> <b>TRANSFORMER TEST REPORT</b>			
Transformator: Transformer: <b>RT 300000-400</b>		Tovarniška številka: Serial number: <b>81671</b>			
<b>7.1</b>	<b>MERITEV NIČNE IMPEDANCE</b> <b>MEASUREMENT OF ZERO-SEQUENCE IMPEDANCE</b>				- SIST EN 60076-1 (odstavek 11.6) - SIST EN 60076-8 (odstavek 4)
	Temperatura; Temperature: <b>26 °C</b>		Frequency; Frekvenz: <b>50 Hz</b>		
Napajano navitje; Supply winding:		<b>VN</b>	<b>VN</b>	<b>VN</b>	<b>NN</b>
Odprto; Open:		<b>NN</b>	<b>NN</b>	<b>NN</b>	<b>VN</b>
Zaprto; Closed:		<b>TN</b>	<b>TN</b>	<b>TN</b>	<b>TN</b>
Tap position; Stufe:		<b>1</b>	<b>13</b>	<b>25</b>	<b>--</b>
	I [A]	<b>303,780</b>	<b>316,61</b>	<b>325,93</b>	<b>997,80</b>
	U [V]	<b>15.317</b>	<b>11.345</b>	<b>8.087</b>	<b>788,3</b>
	P [W]	<b>149.500</b>	<b>122.100</b>	<b>95.500</b>	<b>100.430</b>
	Sr [kVA]	<b>300.000</b>	<b>300.000</b>	<b>300.000</b>	<b>300.000</b>
	Ur [kV]	<b>460,000</b>	<b>400,000</b>	<b>340,000</b>	<b>115,000</b>
	Z <sub>0</sub> [Ω/ph]	<b>151,264</b>	<b>107,498</b>	<b>74,436</b>	<b>2,370</b>
	Z <sub>0</sub> [%]	<b>21,45</b>	<b>20,16</b>	<b>19,32</b>	<b>5,38</b>
	R <sub>0</sub> [Ω/ph]	<b>4,860</b>	<b>3,654</b>	<b>2,697</b>	<b>0,303</b>
	X <sub>0</sub> [Ω/ph]	<b>151,186</b>	<b>107,436</b>	<b>74,387</b>	<b>2,351</b>
	Formule:		Calculation formula:		
$Z_0[\Omega/phase] = 3 \times \frac{U}{I}$		$Z_0[\Omega/phase] = 3 \times \frac{U}{I}$			
$Z_0[\%] = Z_0 \times \frac{S_R}{U^2}$		$Z_0[\%] = Z_0 \times \frac{S_R}{U^2}$			
$R_0[\Omega/phase] = 3 \times \frac{U \times 3}{I^2}$		$R_0[\Omega/phase] = 3 \times \frac{U \times 3}{I^2}$			
$R_0[\%] = R_0 \times \frac{S_R}{U^2}$		$R_0[\%] = R_0 \times \frac{S_R}{U^2}$			
$X_0[\Omega/phase] = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$		$X_0[\Omega/phase] = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$			
$X_0[\%] = X_0 \times \frac{S_R}{U^2}$		$X_0[\%] = X_0 \times \frac{S_R}{U^2}$			
Merilna oprema:		Measuring equipment:			
- močnostni analizator Norma, tip D6000, točnosti ± 0,05 % - merilni napetostni pretvornik Tettex TMS 581, točnosti ± 0,10 % - merilni tokovni transformator Tettex TMS 582, točnosti ± 0,11 %		- power analyzer Norma, type D6000, accuracy ± 0,05 %; - voltage transducer Tettex TMS 581, accuracy ± 0,10 %; - current transformer Tettex TMS 582, accuracy ± 0,11 %;			

Slika 31: Merilni list – meritve nične impedance (vir: Kolektor Etra)

### 5.3 REZULTATI MERITEV IN IZRAČUN NIČNE IMPEDANCE TRANSFORMATORJA

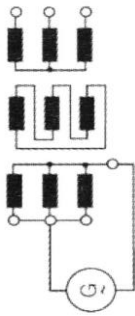
Spodnja Slika 31 prikazuje vezalno shemo priključitve CPC100 in merjenca (transformator) (Omicron 2005).



Slika 32: Vezalna shema priključitve CPC100 in merjenca (vir: Omicron)

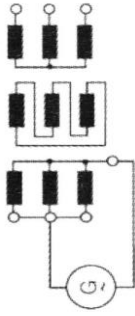
Pregled in rezultati meritev za različne vrste priključitve merjenca.

**5.3.1 Meritev nične impedance:** VN napajano, NN odprt, TN zaprt, stopnja reg. stikala 1, 13 in 25 z NORMO D6000 (Slika 33).

MERITEV NIČNE IMPEDANCE MERJENO Z NORMO D6000					
Temperatura: 26 °C		Frekvenca: 50 Hz			
Napajano navitje:		VN	VN	VN	
Odprto:		NN	NN	NN	
Zaprto:		TN	TN	TN	
Stopnja stikala:		1	13	25	
	I	[A]	303,780	316,61	325,93
	U	[V]	15.317	11.345	8.087
	P	[W]	149.500	122.100	95.500
	Sr	[kVA]	300.000	300.000	300.000
	Ur	[kV]	460,000	400,000	340,000
	Z <sub>0</sub>	[Ω/ph]	151,264	107,498	74,436
	Z <sub>0</sub>	[%]	21,45	20,16	19,32
	R <sub>0</sub>	[Ω/ph]	4,860	3,654	2,697
X <sub>0</sub>	[Ω/ph]	151,186	107,436	74,387	
Formule:					
$Z_0 [\Omega/phase] = 3 * \frac{U}{I} \quad X_0 [\Omega/phase] = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$ $R_0 [\Omega/phase] = 3 * \frac{P}{I^2} \quad Z_0 [%] = Z_0 * \frac{5R}{U_R^2}$					

Slika 33: Merilni list 1 - meritve nične impedance  
(vir: lasten)

Na Sliki 34 Meritev nične impedance: VN napajano, NN odprt, TN zaprt, stopnja reg. stikala 1, 13 in 25 z OMICRON CPC 100

MERITEV NIČNE IMPEDANCE MERJENO Z OMICRON CPC 100					
Temperatura: 21 °C		Frekvenca: 50 Hz			
Napajano navitje:		VN	VN	VN	
Odrpto:		NN	NN	NN	
Zaprto:		TN	TN	TN	
Stopnja stikala:		1	13	25	
	I	[A]	2,36	2,30	2,30
	U	[V]	117,93	81,80	56,55
	P	[W]	10,25	7,75	5,99
	Sr	[kVA]	300.000	300.000	300.000
	U <sub>r</sub>	[kV]	460,000	400,000	340,000
	cos φ		87,64	87,89	87,36
	Z <sub>0</sub>	[Ω/ph]	150,159	106,551	73,665
	Z <sub>0</sub>	[%]	21,29	19,98	19,12
	R <sub>0</sub>	[Ω/ph]	6,173	3,930	3,397
X <sub>0</sub>	[Ω/ph]	150,032	106,478	73,586	
Formule:					
$Z_0 [\Omega/phase] = 3 \cdot \frac{U}{I} \quad X_0 [\Omega/phase] = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$ $R_0 [\Omega/phase] = 3 \cdot \frac{P}{I^2} \quad Z_0 [\%] = Z_0 \cdot \frac{S_R}{U_R^2}$					

Slika 34: Merilni list 2 - meritve nične impedance (vir: lasten)

Tap	V1 AC	V1 AC phase	I AC	Z meas	Z corr	Z0	Z0 (%)
13	81,80 V	87,64 °	2,30 A	35,517 Ω	35,517 Ω	106,551 Ω	19,98 %

Slika 35: VN napajano, NN odprt, TN zaprt, stopnja stikala 13 (vir: Omicron)

U [V]	I [A]	φ [°]	Z <sub>0</sub> [Ω/ph]	Z <sub>0</sub> [%]
81,80	2,30	87,64	106,551	19,98

Tabela 1: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.1 (vir: lasten)

1	117,93 V	87,89 °	2,36 A	50,053 Ω	50,053 Ω	150,159 Ω	21,29 %
---	----------	---------	--------	----------	----------	-----------	---------

Slika 36: VN napajano, NN odprt, TN zaprt, stopnja stikala 1  
(vir: Omicron)

U [V]	I [A]	$\varphi$ [°]	$Z_o$ [Ω/ph]	$Z_o$ [%]
117,93	2,36	87,89	150,159	21,29

Tabela 2: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.1  
(vir: lasten)

25	56,55 V	87,36 °	2,30 A	24,555 Ω	24,555 Ω	73,665 Ω	19,12 %
----	---------	---------	--------	----------	----------	----------	---------

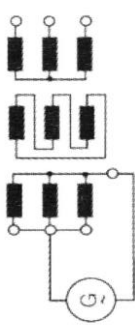
Slika 37: VN napajano, NN odprt, TN zaprt, stopnja stikala 25  
(vir: Omicron)

U [V]	I [A]	$\varphi$ [°]	$Z_o$ [Ω/ph]	$Z_o$ [%]
56,55	2,30	87,36	73,665	19,12

Tabela 3: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.1  
(vir: lasten)



**5.3.2 Meritev nične impedance:** VN napajano, NN zaprt, TN zaprt, stopnja stikala1, 13 in 25 (Slika 38).

MERITEV NIČNE IMPEDANCE		MERJENO Z OMICRON CPC 100			
Temperatura: 21 °C		Frekvenca: 50 Hz			
Napajano navitje:		VN	VN	VN	
Zaprto:		NN	NN	NN	
Zaprto:		TN	TN	TN	
Stopnja stikala:		1	13	25	
	I	[A]	3,03	2,99	2,91
	U	[V]	102,79	69,83	45,93
	P	[W]	9,02	7,07	5,57
	Sr	[kVA]	300.000	300.000	300.000
	U <sub>r</sub>	[kV]	460,000	400,000	340,000
	cos φ		88,34	88,06	87,61
	Z <sub>0</sub>	[Ω/ph]	101,937	70,065	47,304
	Z <sub>0</sub>	[%]	14,45	13,14	12,28
	R <sub>0</sub>	[Ω/ph]	2,947	2,372	1,973
	X <sub>0</sub>	[Ω/ph]	101,894	70,025	47,263
Formule:					
$Z_0 [\Omega/\text{phase}] = 3 \cdot \frac{U}{I} \quad X_0 [\Omega/\text{phase}] = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$ $R_0 [\Omega/\text{phase}] = 3 \cdot \frac{P}{I^2} \quad Z_0 [\%] = Z_0 \cdot \frac{S_R}{U_R^2}$					

Slika 38: Merilni list 3 – meritve nične impedance  
(vir: lasten)

25	45,93 V	87,61 °	2,91 A	15,768 Ω	15,768 Ω	47,304 Ω	12,28 %
----	---------	---------	--------	----------	----------	----------	---------

Slika 39: VN napajano, NN zaprt, TN zaprt, stopnja stikala 25  
(vir: Omicron)

U [V]	I [A]	φ [°]	Z <sub>0</sub> [Ω/ph]	Z <sub>0</sub> [%]
45,93	2,91	87,61	47,304	12,28

Tabela 4: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.2  
(vir: lasten)



13	69,83 V	88,06 °	2,99 A	23,355 Ω	23,355 Ω	70,065 Ω	13,14 %
----	---------	---------	--------	----------	----------	----------	---------

Slika 40: VN napajano, NN zaprt, TN zaprt, stopnja stikala 13  
(vir: Omicron)

U [V]	I [A]	φ[°]	Z <sub>o</sub> [Ω/ph]	Z <sub>o</sub> [%]
69,83	2,99	88,06	70,065	13,14

Tabela 5: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.2  
(vir: lasten)

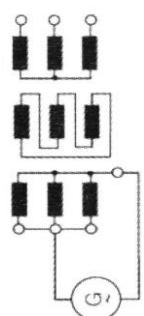
1	102,79 V	88,34 °	3,03 A	33,979 Ω	33,979 Ω	101,937 Ω	14,45 %
---	----------	---------	--------	----------	----------	-----------	---------

Slika 41: VN napajano, NN zaprt, TN zaprt, stopnja stikala 1  
(vir: Omicron)

U [V]	I [A]	φ[°]	Z <sub>o</sub> [Ω/ph]	Z <sub>o</sub> [%]
102,79	3,03	88,34	101,937	14,45

Tabela 6: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.2  
(vir: lasten)

**5.3.3 Meritev nične impedance:** VN napajano, NN odprt, TN odprt, stopnja stikala 13 Slika 42

MERITEV NIČNE IMPEDANCE MERJENO Z OMICRON CPC 100		
Temperatura: 21 °C		Frekvenca: 50 Hz
Napajano navitje:		VN
Odprto:		NN
Odprto:		TN
Stopnja stikala:		13
	I [A]	0,018
	U [V]	171,45
	P [W]	1,16
	Sr [kVA]	300.000
	U <sub>r</sub> [kV]	460,000
	cos φ	67,82
	Z <sub>0</sub> [Ω/ph]	28575
	Z <sub>0</sub> [%]	5357,87
	R <sub>0</sub> [Ω/ph]	10740,741
X <sub>0</sub> [Ω/ph]	26479,560	
Formule:		
$Z_0 [\Omega/\text{phase}] = 3 \cdot \frac{U}{I} \quad X_0 [\Omega/\text{phase}] = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$ $R_0 [\Omega/\text{phase}] = 3 \cdot \frac{P}{I^2} \quad Z_0 [\%] = Z_0 \cdot \frac{S_R}{U_R^2}$		

Slika 42: Merilni list 4 - meritve nične impedance (vir: lasten)

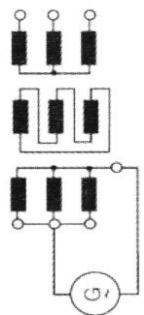
13	171,45 V	67,82 °	18,00 mA	9,525 kΩ	9,525 kΩ	28,575 kΩ	5357,87 %
----	----------	---------	----------	----------	----------	-----------	-----------

Slika 43: VN napajano, NN odprto, TN odprto, stopnja stikala 13 (vir: Omicron)

U [V]	I [mA]	φ [°]	Z <sub>0</sub> [kΩ/ph]	Z <sub>0</sub> [%]
171,45	18,00	67,82	28,575	5357,87

Tabela 7: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.3 (vir: lasten)

**5.3.4 Meritev nične impedance:** VN napajano, NN zaprt, TN odprt, stopnja stikala 13 (Slika 44).

MERITEV NIČNE IMPEDANCE MERJENO Z OMICRON CPC 100		
Temperatura: 21 °C		Frekvenca: 50 Hz
Napajano navitje:		VN
Zaprto:		NN
Odprto:		TN
Stopnja stikala:		13
	I [A]	2,95
	U [V]	69,67
	P [W]	6,10
	Sr [kVA]	300.000
	Ur [kV]	460,000
	cos φ	88,30
	Z <sub>0</sub> [Ω/ph]	70,782
	Z <sub>0</sub> [%]	13,27
	R <sub>0</sub> [Ω/ph]	2,103
	X <sub>0</sub> [Ω/ph]	70,751
Formule:		
$Z_0 [\Omega/phase] = 3 * \frac{U}{I} \quad X_0 [\Omega/phase] = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}$ $R_0 [\Omega/phase] = 3 * \frac{P}{I^2} \quad Z_0 [\%] = Z_0 * \frac{S_R}{U_R^2}$		

Slika 44: Merilni list 5 – meritve nične impedance (vir: lasten)

13	69,67 V	88,30 °	2,95 A	23,594 Ω	23,594 Ω	70,782 Ω	13,27 %
----	---------	---------	--------	----------	----------	----------	---------

Slika 45: VN napajano, NN zaprto, TN odprto, stopnja stikala 13 (vir: Omicron)

U [V]	I [A]	φ [°]	Z <sub>0</sub> [Ω/ph]	Z <sub>0</sub> [%]
69,67	2,95	88,30	70,782	13,27

Tabela 8: izmerjeni in potrebni rezultati za izračun 5.3.4 (vir: lasten)

## Rezultati izračuna

### Izračun 5.3.1: stopnja regulacijskega stikala 1

$$P = \cos \varphi * I * U = 87,89 * 2,36 * 117,93 = 10,25 \text{ W}$$

$$Z_0 [\Omega/\text{phase}] = 3 * \frac{U}{I} = 3 * \frac{117,93}{2,36} = 149,911 \Omega/\text{phase}$$

$$R_0 [\Omega/\text{phase}] = 3 * \frac{P}{I^2} = 3 * \frac{10,25}{2,36^2} = 5,521 \Omega/\text{phase}$$

$$X_0 [\Omega/\text{phase}] = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{149,911^2 - 5,521^2} = 149,809 \Omega/\text{phase}$$

$$Z_0 [\%] = Z_0 * \frac{S_R}{U_R^2} * 100 = 149,911 * \frac{300000}{460,000^2} * 100 = 21,25\%$$

### Izračun 5.3.1

Stopnja stikala		1	13	25
I	[A]	2,36	2,30	2,30
U	[V]	117,93	81,80	56,55
Sr	[kVA]	300.000	300.000	300.000
Ur	[kV]	460,000	400,000	340,000
cos $\phi$		87,89	87,64	87,36
P	[W]	10,25	7,75	5,99
Zo	[%]	21,25	20,00	19,14
Zo	[ $\Omega$ /ph]	149,911	106,696	73,761
Ro	[ $\Omega$ /ph]	5,521	4,395	3,397
Xo	[ $\Omega$ /ph]	149,809	106,605	73,683

Tabela 9: podatki za izračun 5.3.1  
(vir: lasten)

Iz Tabele 1, 2, 3 smo vzeli izmerjene podatke, da smo lahko v izračunu 5.3.1 izračunali delovno moč, nično upornost in nično reaktanco. Poleg tega, smo preverili, koliko med izračunom 5.3.1 in merjenimi rezultati z omicronom odstopata nični impedanci.

**Izračun 5.3.2**

Stopnja stikala		1	13	25
I	[A]	3,03	2,99	2,91
U	[V]	102,79	69,83	45,93
Sr	[kVA]	300.000	300.000	300.000
Ur	[kV]	460,000	400,000	340,000
cos $\phi$		88,34	88,06	87,61
P	[W]	9,02	7,07	5,57
Zo	[%]	14,43	13,14	12,29
Zo	[ $\Omega$ /ph]	101,772	70,063	47,350
Ro	[ $\Omega$ /ph]	2,947	2,372	1,973
Xo	[ $\Omega$ /ph]	101,729	70,023	47,309

*Tabela 10: podatki za izračun 4.3.2  
(vir: lasten)*

Iz Tabele 4, 5, 6 smo vzeli izmerjene podatke, da smo lahko v izračunu 5.3.2 izračunali delovno moč, nično upornost in nično reaktanco. Poleg tega smo preverili, koliko med izračunom 5.3.2 in merjenimi rezultati z omicronom odstopata nični impedanci.

**Izračun 5.3.3**

Stopnja stikala		13
I	[A]	0,018
U	[V]	171,45
Sr	[kVA]	300.000
Ur	[kV]	400,000
cos $\phi$		67,82
P	[W]	1,16
Zo	[%]	5357,81
Zo	[ $\Omega$ /ph]	28575
Ro	[ $\Omega$ /ph]	10740,741
Xo	[ $\Omega$ /ph]	26479,560

*Tabela 11: podatki za izračun 5.3.3  
(vir: lasten)*

Iz Tabele 7 smo vzeli izmerjene podatke, da smo lahko v izračunu 5.3.3 izračunali delovno moč, nično upornost in nično reaktanco. Poleg tega smo preverili, koliko med izračunom 5.3.3 in merjenimi rezultati z omicronom odstopata nični impedanci.

**Izračun 5.3.4**

<b>Stopnja stikala</b>		13
I	[A]	2,95
U	[V]	69,67
Sr	[kVA]	300.000
Ur	[kV]	400,000
cos $\phi$		88,30
P	[W]	6,10
Z <sub>0</sub>	[%]	13,28
Z <sub>0</sub>	[ $\Omega$ /ph]	70,851
R <sub>0</sub>	[ $\Omega$ /ph]	2,103
X <sub>0</sub>	[ $\Omega$ /ph]	70,820

*Tabela 12: podatki za izračun 5.3.4  
(vir: lasten)*

Iz Tabele 8 smo vzeli izmerjene podatke, da smo lahko v izračunu 5.3.4 izračunali delovno moč, nično upornost in nično reaktanco. Poleg tega smo preverili, koliko med izračunom 5.3.4 in merjenimi rezultati z omicronom odstopata nični impedanci.

### 5.3.5 Primerjalna tabela rezultatov nične impedance na 400 kV strani transformatorja

V Tabeli 13 so zajete meritve ničnih impedanc po obeh metodah: VN napajano, NN odprt, TN zaprt, stopnja reg. stikala 13.

Tabela 13 prikazuje primerjavo rezultatov Norma – CPC 100

Metoda	Z <sub>0</sub> [ $\Omega$ ]	R <sub>0</sub> [ $\Omega$ ]	X <sub>0</sub> [ $\Omega$ ]
Norma	107,498	3,654	107,436
Omicron CPC 100	106,551	4,395	106,460

*Tabela 13: prikazani rezultati meritev po obeh metodah  
(vir: lasten)*

Za izračun nastavitvev distančne zaščite smo vzeli Z<sub>0</sub> = 106,551  $\Omega$

Ostale meritve z Omicronom smo primerjali s tabelo BBC in se skladajo glede razmerja  $\frac{Z_+}{Z_0}$  na Sliki 11. Rezultati meritev ustrezajo pričakovanim izračunanim vrednostim.

## 6. ZAKLJUČEK

1. Meritve parametrov po izdelavi TR-ja so pomembne tako za konstruktorje kot naročnike velikih TR-ov. Izmerjene vrednosti so potrditev predvidenih in zahtevanih vrednosti v pogodbah pri naročilu oziroma odstopanja v predvidenih tolerancah. V kolikor so vrednosti nekaterih parametrov izven toleranc, lahko postane velik strošek za izdelovalca transformatorjev.
2. Nekateri parametri, kot so nične impedance, se največkrat pri izdelavi sploh niso merile, ampak so se naročniki zadovoljili s pavšalnimi vrednostmi iz literature. Kolikšne so razlike, je odvisno od izvedbene konstrukcije in načina ozemljitve zvezdišč. Velika tveganja izven toleranc nastajajo pri veznih skupinah YNyn brez trikotnega navitja, in sicer pri tristebnih izvedbah.
3. Nične impedance so se do sedaj lahko merile le v tovarni, medtem ko so proizvajalci merilne opreme »Omicron« razvili napravo, ki omogoča meritve na TR-u tudi na terenu, ki že obratujejo in lahko ugotavljamo, koliko so se vrednosti spremenile po določenem času.
4. Meritve in dejanske vrednosti impedanc velikih TR-jev služijo uporabnikom za nastavitve distančnih zaščit na TR-u, ki dejansko v svoji rezervni vlogi ščitijo transformator in slovenska omrežja 110, 220 ali 400 kV.
5. V diplomu smo poskušali izpolniti pričakovanja konstruktorjev z meritvami na obstoječem novem TR-u 300 MVA, 400/110/10,5 kV vezave YNyn0d5 in predlagali možne nastavitve numeričnih distančnih relejev s konkretnimi podatki TR-a, DV-ja in omrežja 110 in 400 kV navedenih v literaturi Inštituta Milana Vidmarja iz Ljubljane (EIMV).

## LITERATURA IN VIRI

EIMV. (2008). – Ref. št.1636. Izračuni kratkostičnih razmer. Slovenija.

Eles. (2000). Osnovni principi nastavitve distančne zaščite.

Grčar, B. (1999). Uvod v zaščito elektroenergetskih sistemov.

IEEE. (2008). Standard C37.91.

Kolektor Etra. Ljubljana: Interna literatura.

Omicron. (2005). CPC Reference manual.

Omicron. (2016). Primary Test Manager. Testing and management software for medium and high-voltage.

Phaff, C. oktober (1970). Relais und Schutztechnik (CH-ES 14-02 D). BBC / BROWN BOVERI. Rechengrößen für Hochspannungsanlagen (Allgemeine technische Unterlagen-Netzunterlagen).

Roeper, R. (1987). Kratkostični tokovi v trifaznih omrežjih, Časovni potek in izračun veličin. FER

Štruc, S., Prepeluh, F., Majcen, A., Kragelj, J. (avgust 2007). Zaščita elektroenergetskih sistemov. Ljubljana: Interno gradivo ICES.

Ziegler, G. (2005). Numerical Distance Protection. Principles and Applications. SIEMENS.